Department of Digital Business
Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)
Homepage: https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS
Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 24523-24532
P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Rancang Bangun dan Analisis Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis IoT Menggunakan ESP32

Rahmad Hidayat, Sukarman Purba, Rusdi Syafii Hutabarat
Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Indonesia
rahmad.5233131023@mhs.unimed.ac.id, sukarmanpurba@unimed.ac.id, rusdisyafii.5231131002@mhs.unimed.ac.id

Abstrak

Motor Brushless Direct Current (BLDC) banyak digunakan pada sistem otomasi modern karena memiliki efisiensi tinggi, respons dinamis yang cepat, dan tingkat keandalan yang baik. Namun, pengendalian kecepatan motor BLDC masih umumnya dilakukan secara lokal sehingga membatasi fleksibilitas pemantauan dan pengaturan jarak jauh. Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis sistem kendali kecepatan motor BLDC berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem dikembangkan dengan memanfaatkan local web server berbasis Wi-Fi untuk mengatur nilai Pulse Width Modulation (PWM) secara real-time. Metode penelitian meliputi perancangan sistem, perakitan perangkat keras, pemrograman ESP32, serta pengujian performa motor pada variasi nilai PWM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM dari 1250 hingga 2000 menyebabkan arus meningkat dari 1,1 A menjadi 4,2 A, daya dari 13 W menjadi 50 W, dan kecepatan motor dari 49.000 RPM menjadi 94.000 RPM. Tegangan sistem hanya mengalami penurunan sebesar 0,06 V pada kondisi beban maksimum sehingga sistem tetap bekerja stabil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengendalikan kecepatan motor BLDC secara responsif dan efektif melalui jaringan Wi-Fi lokal. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa kenaikan PWM menghasilkan peningkatan kecepatan secara konsisten, sedangkan penurunan tegangan relatif kecil. Arsitektur local web server mengurangi ketergantungan pada layanan cloud dan memungkinkan pengoperasian melalui perangkat dalam jaringan yang sama. Sistem ini berpotensi dikembangkan dengan umpan balik kecepatan, proteksi arus dan suhu, serta pencatatan data untuk meningkatkan akurasi dan keamanan operasional.

Kata kunci: Motor BLDC, ESP32, Internet of Things, Kendali Kecepatan, PWM

1. Latar Belakang

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan salah satu jenis penggerak elektrik yang semakin populer digunakan dalam aplikasi industri modern dan sistem transportasi pintar, termasuk pada platform pengujian bangku (test bench) performa motor [1]. Keunggulan motor BLDC terletak pada tingkat efisiensi operasionalnya yang tinggi, masa pakai yang panjang, serta perawatan yang minimal karena tidak lagi menggunakan sikat mekanis (brush). Kendati demikian, dalam pengoperasiannya, motor BLDC memerlukan strategi kendali kecepatan dan torsi yang presisi guna memastikan stabilitas performa saat menghadapi fluktuasi beban yang dinamis [2]. Pemahaman komprehensif mengenai penentuan daya motor, karakteristik efisiensi, dan konsumsi energi baterai yang optimal menjadi faktor krusial yang mendasari perancangan sistem penggerak berbasis motor BLDC [3].

Seiring dengan pesatnya kemajuan teknologi otomasi, integrasi konsep Internet of Things (IoT) ke dalam kendali sistem motor listrik menawarkan fleksibilitas yang signifikan melalui kemampuan pemantauan nirkabel jarak jauh. Implementasi IoT untuk melakukan pengawasan parameter fisis secara real-time terbukti efektif dalam meminimalkan risiko kerusakan dini serta memfasilitasi langkah perawatan preventif pada motor induksi tiga fasa maupun motor sinkron lainnya [4]. Modul mikrokontroler canggih seperti ESP32 sering kali menjadi pilihan utama dalam perancangan perangkat elektronika IoT pintar karena telah dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi terintegrasi, kemampuan pemrosesan dual-core, serta kompatibilitas yang luas terhadap berbagai protokol komunikasi data [5], [6].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi pemanfaatan ESP32 untuk berbagai aplikasi sistem monitoring terdistribusi dan akuisisi data nirkabel berbasis open-source, seperti pemantauan tangki air pintar, pengukuran debit fluida digital, hingga sistem kontrol arsitektur SCADA pada pemantauan pembangkit listrik tenaga surya (PV) [7], [8], [9]. Di samping itu, fungsionalitas ESP32 juga banyak dikembangkan untuk analisis

pengereman regeneratif pada kendaraan listrik, sistem pemrosesan citra (image processing) digital untuk navigasi objek daerah bencana, serta otomatisasi sektor pertanian modern berbasis platform Blynk [10], [11], [12].

Meskipun sistem pemantauan nirkabel telah berkembang pesat, aspek perlindungan termal dan metode algoritma kontrol kecepatan internal pada kontroler motor tetap menjadi fokus kritis utama dalam rekayasa sistem penggerak. Pengoperasian motor pada beban tinggi secara kontinu berpotensi menimbulkan panas berlebih (overheat) yang dapat merusak komponen inverter (MOSFET), sehingga diperlukan implementasi modul proteksi suhu berbasis mikrokontroler pendukung [13]. Guna menstabilkan respons transien motor BLDC terhadap target putaran tertentu, penerapan algoritma kontrol konvensional seperti Proportional Integral (PI) terus dianalisis untuk mereduksi error steady-state serta mempercepat waktu tunak (rise time) sistem [14]. Selain di bidang industri motor, pemanfaatan ESP32 yang terhubung ke jaringan nirkabel juga diimplementasikan untuk sistem pengiriman informasi jarak jauh berbasis website [15].

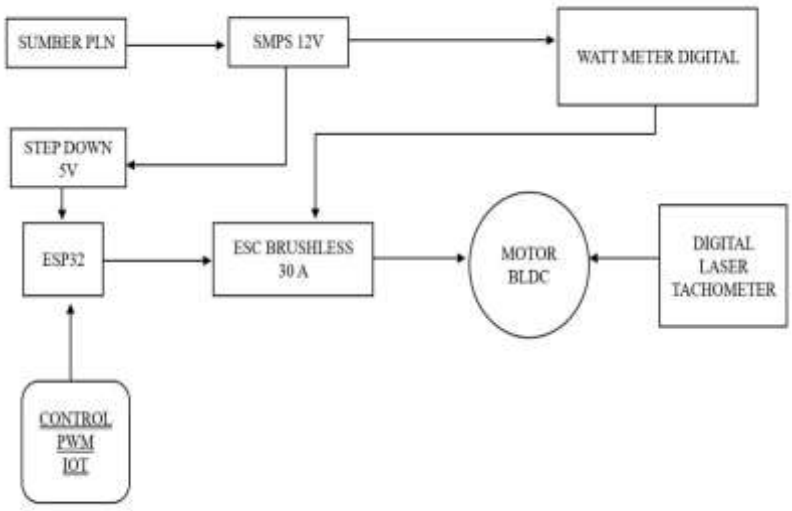
Namun demikian, sebagian besar sistem kendali berbasis IoT yang dikembangkan sebelumnya masih bergantung penuh pada platform cloud pihak ketiga atau terfokus hanya pada fungsi pemantauan sepihak tanpa kontrol balik yang dinamis. Implementasi arsitektur jaringan kontrol nirkabel yang memanfaatkan fungsi mandiri ESP32 sebagai local web server untuk mengemudikan kecepatan motor BLDC melalui modulasi lebar pulsa atau Pulse Width Modulation (PWM) secara mandiri masih relatif terbatas. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis sistem kendali kecepatan motor BLDC berbasis IoT dengan memanfaatkan fitur local web server nirkabel pada ESP32 secara responsif, murah, dan stabil tanpa ketergantungan pada jaringan internet eksternal.

2. Metode Penelitian

2.1. Perancangan Sistem

Penelitian ini dilakukan dengan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kecepatan motor Brushless Direct Current (BLDC) berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem dirancang agar pengguna dapat mengendalikan kecepatan motor secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi menggunakan local web server yang berjalan pada ESP32. Pengaturan kecepatan motor dilakukan dengan memberikan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) dari ESP32 menuju Electronic Speed Controller (ESC) 30A yang berfungsi sebagai pengendali putaran motor BLDC.

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas Switching Mode Power Supply (SMPS) 12 V sebagai sumber daya utama, buck converter sebagai penurun tegangan menjadi 5 V untuk kebutuhan ESP32, ESP32 sebagai pengendali utama, ESC 30A sebagai driver motor, motor BLDC sebagai aktuator, watt meter digital sebagai alat ukur parameter kelistrikan, dan digital laser tachometer sebagai alat ukur kecepatan putaran motor. Diagram blok sistem yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



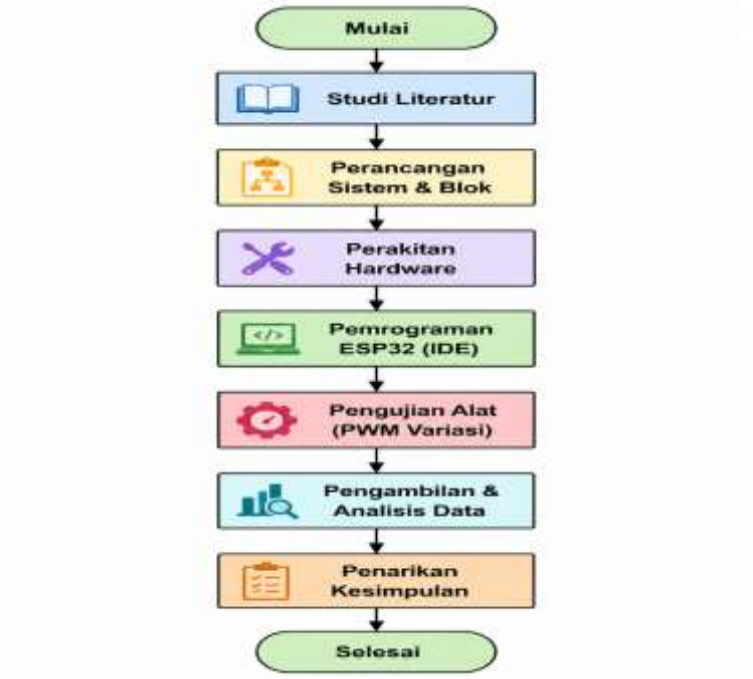
Gambar 1. Blok Diagram Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis IoT

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

2.2. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. ESP32 dikonfigurasi sebagai local web server yang dapat diakses melalui browser pada komputer maupun smartphone yang terhubung ke jaringan Wi-Fi ESP32. Antarmuka web server digunakan untuk mengirimkan nilai PWM sebagai parameter pengaturan kecepatan motor BLDC.

Saat pengguna memberikan nilai PWM melalui halaman web, ESP32 akan memproses perintah tersebut dan mengirimkan sinyal PWM ke ESC. Selanjutnya, ESC mengatur kecepatan putaran motor BLDC sesuai dengan nilai PWM yang diterima. Proses ini berlangsung secara real-time sehingga pengguna dapat mengendalikan kecepatan motor tanpa menggunakan panel kontrol konvensional.



Gambar 2. Flowchart Tahapan Pelaksanaan Penelitian

2.3. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai PWM terhadap performa motor BLDC. Nilai PWM yang digunakan dalam pengujian yaitu 1250, 1500, 1750, dan 2000. Pada setiap variasi PWM dilakukan pengukuran terhadap parameter arus listrik, daya listrik, tegangan kerja sistem, dan kecepatan putaran motor. Pengukuran arus, daya, dan tegangan dilakukan menggunakan watt meter digital, sedangkan pengukuran kecepatan putaran motor dilakukan menggunakan digital laser tachometer.

Data hasil pengujian yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara perubahan nilai PWM terhadap karakteristik kerja motor BLDC. Analisis dilakukan dengan membandingkan perubahan arus, daya, tegangan, dan kecepatan putaran motor pada setiap variasi PWM yang diberikan melalui local web server berbasis ESP32.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Implementasi Sistem Kendali Motor BLDC Berbasis IoT

Sistem kendali kecepatan motor Brushless Direct Current (BLDC) berbasis Internet of Things (IoT) berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Sistem terdiri atas mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, Electronic Speed Controller (ESC) 30A sebagai penggerak motor, motor BLDC sebagai aktuator, serta local web server sebagai media pengaturan kecepatan motor. Seluruh komponen diintegrasikan sehingga membentuk sistem kendali yang dapat dioperasikan secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi.

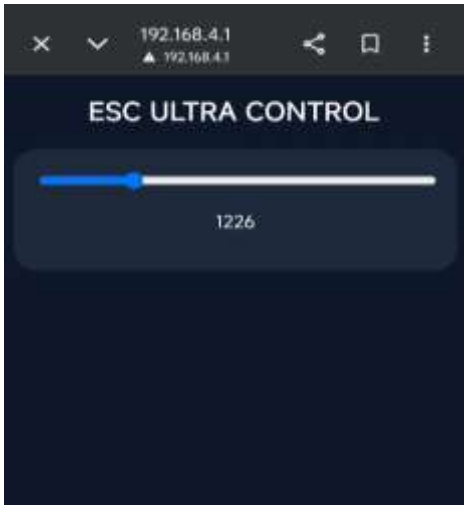
DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

ESP32 dikonfigurasi sebagai local web server yang memungkinkan pengguna mengakses antarmuka kendali melalui browser pada komputer maupun smartphone. Melalui halaman web tersebut, pengguna dapat memberikan nilai Pulse Width Modulation (PWM) untuk mengatur kecepatan putaran motor secara real-time. Perubahan nilai PWM yang diberikan pengguna dapat langsung diproses oleh ESP32 dan diteruskan ke ESC untuk mengendalikan kecepatan motor sesuai perintah yang diberikan.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi pengendalian kecepatan motor dengan baik tanpa memerlukan panel kontrol fisik maupun platform IoT pihak ketiga. Implementasi perangkat keras dan antarmuka web server yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Implementasi Perangkat Keras Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis ESP32



Gambar 4. Antarmuka Web Server untuk Pengendalian Kecepatan Motor BLDC

3.2. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dengan memberikan empat variasi nilai PWM, yaitu 1250, 1500, 1750, dan 2000. Pada setiap variasi PWM dilakukan pengukuran terhadap parameter arus listrik, daya listrik, tegangan sistem, dan kecepatan putaran motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa motor BLDC. Data hasil pengujian yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Performa Motor BLDC Terhadap Variasi PWM

PWM	Arus (A)	Daya (W)	Kecepatan (RPM)	Tegangan (V)
1250	1,1	13	49.000	12,16
1500	1,8	22	64.000	12,14
1750	2,6	31	77.000	12,14
2000	4,2	50	94.000	12,10

Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa peningkatan nilai PWM menyebabkan kenaikan arus, daya, dan kecepatan putaran motor. Sebaliknya, tegangan sistem mengalami sedikit penurunan seiring meningkatnya beban kerja motor. Hasil ini menunjukkan bahwa sinyal PWM yang diberikan oleh ESP32 berpengaruh langsung terhadap karakteristik operasional motor BLDC.

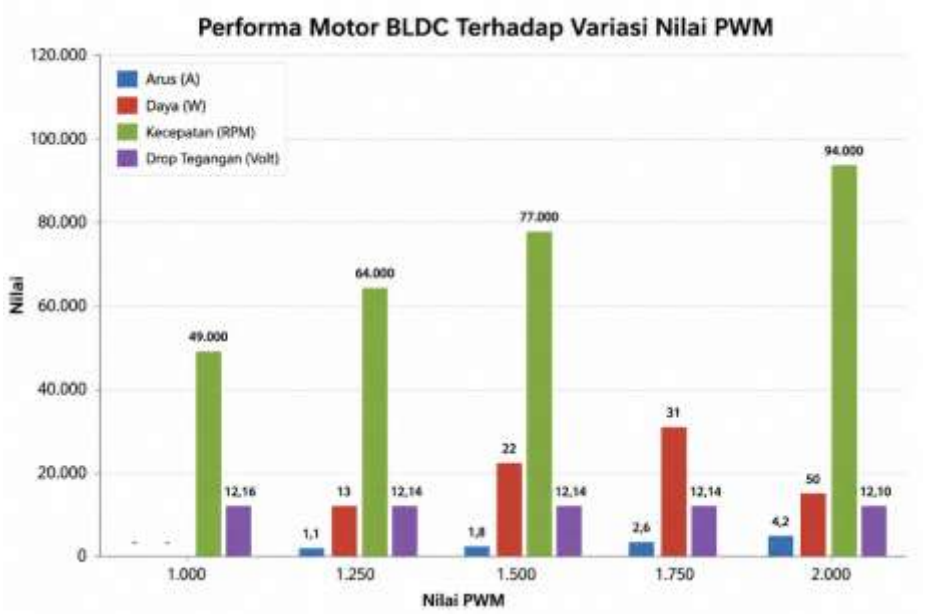
3.3. Diskusi Pengaruh PWM terhadap Kinerja Motor BLDC

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, peningkatan nilai PWM berpengaruh langsung terhadap konsumsi arus, daya, dan kecepatan putaran motor BLDC. Pada nilai PWM 1250, motor mengonsumsi arus sebesar 1,1 A dengan daya sebesar 13 W dan menghasilkan kecepatan putaran sebesar 49.000 RPM. Ketika nilai PWM ditingkatkan menjadi 2000, arus meningkat menjadi 4,2 A, daya mencapai 50 W, dan kecepatan motor meningkat hingga 94.000 RPM.

Peningkatan arus dan daya terjadi karena semakin besar nilai PWM yang diberikan, semakin besar energi listrik yang disalurkan oleh ESC ke motor BLDC. Kondisi tersebut menyebabkan motor menghasilkan torsi dan kecepatan putaran yang lebih tinggi. Hubungan yang berbanding lurus antara nilai PWM dan kecepatan motor menunjukkan bahwa metode pengendalian yang diterapkan mampu bekerja secara efektif dalam mengatur performa motor sesuai kebutuhan pengguna.

Selain memengaruhi arus, daya, dan kecepatan motor, peningkatan nilai PWM juga menyebabkan terjadinya penurunan tegangan sistem secara bertahap. Tegangan sistem yang semula sebesar 12,16 V pada PWM 1250 menurun menjadi 12,10 V pada PWM 2000. Penurunan tegangan sebesar 0,06 V tersebut masih berada dalam batas toleransi yang aman sehingga tidak memengaruhi stabilitas operasi sistem secara keseluruhan.

Penggunaan buck converter terbukti mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran sebesar 5 V yang digunakan untuk menyuplai ESP32. Dengan demikian, meskipun terjadi peningkatan beban pada motor BLDC, mikrokontroler tetap dapat beroperasi secara normal tanpa mengalami reset maupun gangguan komunikasi selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 5. Performa Motor BLDC terhadap Variasi Nilai PWM

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

3.4. Analisis Respons Pengendalian melalui Local Web Server

Implementasi ESP32 sebagai local web server memberikan karakteristik pengendalian yang berbeda dari arsitektur IoT berbasis cloud. Perintah pengaturan kecepatan tidak perlu dikirim ke server eksternal, melainkan diproses langsung oleh ESP32 setelah pengguna memasukkan nilai PWM melalui browser. Alur perintah yang lebih pendek tersebut mengurangi ketergantungan terhadap kualitas koneksi internet dan memungkinkan sistem tetap digunakan pada lokasi yang tidak memiliki akses internet. Dalam konteks laboratorium, bengkel, atau fasilitas pendidikan, pendekatan ini relevan karena pengguna cukup terhubung ke jaringan Wi-Fi lokal yang dibentuk atau diakses oleh ESP32. Hasil implementasi yang memperlihatkan bahwa perubahan nilai PWM dapat diteruskan kepada ESC dan mengubah putaran motor menunjukkan bahwa komunikasi antara antarmuka web, mikrokontroler, dan aktuator telah berjalan sesuai fungsi yang direncanakan. Temuan tersebut mendukung pemanfaatan ESP32 sebagai perangkat IoT mandiri yang memiliki kemampuan pemrosesan dan konektivitas terintegrasi sebagaimana dibahas pada penelitian sebelumnya [5].

Walaupun pengendalian berlangsung secara real-time dari sudut pandang operasional, penelitian ini belum mengukur waktu tunda komunikasi secara khusus. Oleh karena itu, istilah responsif pada sistem lebih tepat dimaknai sebagai kemampuan sistem menerima perintah dan menghasilkan perubahan kecepatan tanpa gangguan yang terlihat selama pengujian, bukan sebagai nilai latensi yang telah dibuktikan secara kuantitatif. Pengukuran latensi dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya dengan mencatat selisih waktu antara pengiriman perintah dari browser, perubahan lebar pulsa pada keluaran ESP32, dan perubahan kecepatan yang terbaca oleh tachometer. Pengukuran tersebut penting karena kualitas kendali nirkabel tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan koneksi, tetapi juga oleh konsistensi waktu respons ketika jaringan menerima gangguan, jumlah pengguna bertambah, atau jarak perangkat terhadap titik akses meningkat. Dengan demikian, hasil penelitian saat ini telah membuktikan kelayakan fungsional arsitektur local web server, sedangkan evaluasi performa komunikasi secara terukur masih menjadi ruang pengembangan berikutnya.

Penggunaan browser sebagai antarmuka juga memberikan keuntungan dalam kompatibilitas perangkat. Pengguna tidak perlu memasang aplikasi khusus karena halaman kendali dapat diakses melalui komputer, tablet, atau smartphone selama perangkat berada dalam jaringan yang sama. Pendekatan ini menyederhanakan proses pengoperasian dan pemeliharaan perangkat lunak. Perubahan tampilan maupun logika kendali dapat dilakukan pada program ESP32 tanpa mendistribusikan aplikasi baru kepada setiap pengguna. Namun, kemudahan akses tersebut perlu diikuti dengan mekanisme keamanan yang memadai apabila sistem digunakan di luar lingkungan pengujian. Halaman kendali sebaiknya dilengkapi autentikasi, pembatasan pengguna, validasi rentang PWM, dan fitur penghentian darurat. Pembatasan rentang masukan diperlukan agar pengguna tidak mengirim nilai di luar kemampuan ESC atau motor. Dengan tambahan tersebut, local web server tidak hanya berfungsi sebagai media kendali yang praktis, tetapi juga dapat menjadi antarmuka operasional yang lebih aman untuk penggunaan berulang.

3.5. Karakteristik Kelistrikan dan Perubahan Kecepatan Motor

Data pengujian memperlihatkan pola peningkatan yang konsisten pada arus, daya, dan kecepatan ketika nilai PWM dinaikkan dari 1250 menjadi 2000. Kecepatan bertambah dari 49.000 RPM menjadi 94.000 RPM atau meningkat sekitar 91,84%. Pada rentang yang sama, arus meningkat dari 1,1 A menjadi 4,2 A atau sekitar 281,82%, sedangkan daya meningkat dari 13 W menjadi 50 W atau sekitar 284,62%. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kebutuhan energi listrik berlangsung lebih cepat daripada peningkatan kecepatan putaran. Kondisi ini wajar karena sebagian energi digunakan untuk mengatasi rugi-rugi pada motor, ESC, penghantar, dan komponen mekanis. Ketika putaran semakin tinggi, rugi tembaga, rugi switching, gesekan, dan hambatan udara juga cenderung meningkat. Oleh sebab itu, hubungan antara PWM dan kecepatan tidak dapat langsung dipahami sebagai hubungan efisiensi yang selalu linear. Data penelitian membuktikan bahwa PWM efektif mengatur kecepatan, tetapi belum cukup untuk menyimpulkan titik operasi yang paling efisien.

Indikasi perubahan efisiensi dapat dilihat secara terbatas melalui rasio kecepatan terhadap daya masukan. Pada PWM 1250, rasio yang diperoleh sekitar 3.769 RPM/W, kemudian menurun menjadi sekitar 2.909 RPM/W pada PWM 1500, 2.484 RPM/W pada PWM 1750, dan 1.880 RPM/W pada PWM 2000. Penurunan rasio ini menunjukkan bahwa tambahan daya pada nilai PWM yang lebih tinggi tidak menghasilkan tambahan kecepatan dengan proporsi yang sama. Meskipun demikian, rasio RPM/W bukan ukuran efisiensi motor yang sesungguhnya karena penelitian belum mengukur torsi keluaran dan daya mekanis pada poros. Efisiensi yang tepat harus dihitung dari perbandingan daya mekanis keluaran terhadap daya listrik masukan. Oleh karena itu, hasil rasio tersebut hanya dapat digunakan sebagai indikasi awal bahwa pengoperasian pada kecepatan maksimum perlu mempertimbangkan konsumsi energi, kebutuhan torsi, dan durasi kerja, bukan hanya pencapaian RPM tertinggi.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Kenaikan arus dari 1,1 A menjadi 4,2 A juga memiliki implikasi terhadap pemilihan sumber daya, ESC, kabel, dan konektor. Walaupun ESC yang digunakan memiliki kapasitas 30 A dan arus pengujian masih berada jauh di bawah batas tersebut, arus yang meningkat akan menambah panas pada komponen elektronik dan penghantar. Dalam penggunaan jangka panjang, kapasitas nominal komponen perlu disertai margin keamanan serta pertimbangan ventilasi dan pelepasan panas. Sumber daya juga harus mampu mempertahankan tegangan ketika motor mengalami beban mekanis atau percepatan mendadak. Data saat ini diperoleh pada kondisi pengujian yang belum memvariasikan beban, sehingga kebutuhan arus pada aplikasi nyata dapat lebih tinggi. Analisis ini menegaskan bahwa pemilihan komponen tidak cukup hanya berdasarkan arus rata-rata hasil uji, tetapi perlu mempertimbangkan arus puncak, karakteristik beban, dan kondisi operasi terburuk.

3.6. Stabilitas Tegangan dan Keandalan Sistem

Stabilitas suplai merupakan bagian penting dalam sistem yang menggabungkan motor berdaya relatif besar dengan mikrokontroler yang sensitif terhadap perubahan tegangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan menurun dari 12,16 V pada PWM 1250 menjadi 12,10 V pada PWM 2000. Penurunan 0,06 V setara dengan sekitar 0,49% dari tegangan awal, sehingga perubahan tersebut relatif kecil pada kondisi pengujian. Tegangan yang tetap berada di sekitar 12 V menunjukkan bahwa SMPS mampu memasok kebutuhan motor pada rentang PWM yang digunakan. Pada sisi kendali, buck converter menyediakan tegangan 5 V untuk ESP32 sehingga perubahan beban motor tidak secara langsung diteruskan ke mikrokontroler. Pemisahan tingkat tegangan ini membantu menjaga ESP32 tetap aktif dan mempertahankan komunikasi Wi-Fi selama pengujian. Tidak ditemukannya reset atau terputusnya komunikasi merupakan indikasi bahwa rancangan catu daya telah bekerja secara memadai untuk konfigurasi yang diuji.

Meskipun penurunan tegangan tergolong kecil, evaluasi keandalan belum dapat hanya didasarkan pada empat titik pengukuran. Sistem motor dapat mengalami gangguan sesaat ketika mulai berputar, menerima perubahan perintah secara mendadak, atau menghadapi beban mekanis. Gangguan tersebut dapat berupa lonjakan arus, noise elektromagnetik, dan penurunan tegangan sesaat yang tidak selalu terbaca oleh watt meter dengan resolusi waktu terbatas. Penelitian lanjutan dapat menggunakan osiloskop atau pencatat data berkecepatan tinggi untuk mengamati bentuk gelombang suplai, keluaran PWM, serta respons tegangan ketika nilai perintah berubah. Penambahan kapasitor decoupling, pengaturan grounding, pemisahan jalur daya dan sinyal, serta penyaringan noise juga perlu dievaluasi untuk mencegah gangguan pada ESP32. Langkah tersebut menjadi semakin penting apabila motor, kabel daya, dan mikrokontroler ditempatkan dalam ruang yang berdekatan.

Keandalan operasional juga berkaitan dengan suhu ESC, motor, buck converter, dan sumber daya. Penelitian ini belum menyajikan data temperatur, sehingga kestabilan yang diperoleh hanya menggambarkan fungsi sistem selama periode pengujian yang dilakukan. Pada operasi kontinu, kenaikan arus dapat meningkatkan suhu MOSFET pada ESC dan kumparan motor. Risiko ini sejalan dengan pentingnya proteksi overheat pada pengendali motor BLDC yang telah dibahas dalam penelitian sebelumnya [13]. Sistem dapat dikembangkan dengan sensor suhu pada ESC dan badan motor, kemudian ESP32 menetapkan batas peringatan serta menurunkan PWM secara otomatis ketika suhu melewati ambang aman. Proteksi arus lebih dan kehilangan koneksi juga dapat ditambahkan. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu menjalankan perintah pengguna, tetapi juga memiliki mekanisme perlindungan untuk mencegah kerusakan ketika terjadi kondisi abnormal.

3.7. Keunggulan dan Implikasi Penerapan Sistem Berbasis IoT

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi IoT tidak selalu memerlukan layanan cloud. Pada sistem ini, fungsi IoT diwujudkan melalui konektivitas nirkabel, antarmuka berbasis web, serta pertukaran perintah antara pengguna dan perangkat secara langsung. Arsitektur lokal memberikan beberapa manfaat, yaitu biaya operasional yang rendah, tidak memerlukan akun pada platform pihak ketiga, dan tetap dapat digunakan ketika internet eksternal tidak tersedia. Karakteristik tersebut sesuai untuk media praktikum, prototipe otomasi, pengujian motor, maupun peralatan pada area dengan konektivitas terbatas. Sistem juga lebih mudah direplikasi karena komponen utamanya tersedia luas dan pemrograman dapat dilakukan melalui Arduino IDE. Dengan demikian, rancangan ini memiliki nilai praktis sebagai contoh integrasi sistem tenaga, kendali, mikrokontroler, dan jaringan komputer dalam satu perangkat.

Pada bidang pendidikan teknik elektro, sistem dapat digunakan sebagai media pembelajaran untuk menjelaskan hubungan antara nilai PWM, arus, daya, tegangan, dan kecepatan motor. Mahasiswa dapat mengamati bahwa perintah digital pada halaman web menghasilkan perubahan fisik pada aktuator. Data hasil pengujian juga dapat digunakan untuk melatih analisis karakteristik motor dan pemilihan komponen. Apabila sistem dilengkapi pencatatan otomatis, setiap percobaan dapat disimpan dalam bentuk tabel maupun grafik sehingga proses evaluasi menjadi lebih sistematis. Pembelajaran tidak hanya berfokus pada pengoperasian motor, tetapi juga mencakup

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

desain antarmuka, komunikasi Wi-Fi, keamanan akses, pengolahan data, dan evaluasi keselamatan. Integrasi lintas bidang tersebut memperkuat relevansi sistem sebagai platform pembelajaran berbasis proyek.

Dalam aplikasi otomasi sederhana, pengendalian nirkabel dapat mengurangi kebutuhan panel fisik dan memungkinkan operator berada pada jarak yang lebih aman dari bagian motor yang berputar. Namun, sistem berbasis web tidak boleh diposisikan sebagai satu-satunya lapisan keselamatan. Tombol penghentian darurat secara fisik tetap diperlukan karena gangguan jaringan atau perangkat lunak dapat terjadi. Nilai PWM minimum dan maksimum harus dibatasi pada program, sedangkan kondisi awal setelah ESP32 dinyalakan perlu ditetapkan pada posisi aman. Selain itu, sistem perlu memastikan motor berhenti apabila koneksi terputus atau tidak ada perintah dalam jangka waktu tertentu. Penerapan prinsip fail-safe tersebut akan meningkatkan kelayakan sistem ketika dikembangkan dari prototipe laboratorium menuju perangkat operasional.

3.8. Keterbatasan Pengujian dan Validitas Hasil

Hasil yang diperoleh telah menunjukkan kecenderungan hubungan antara PWM dan performa motor, tetapi ruang lingkup pengujian masih terbatas. Pengujian hanya menggunakan empat nilai PWM, sehingga bentuk hubungan di antara titik-titik tersebut belum dapat dipetakan secara rinci. Penambahan interval PWM yang lebih rapat akan membantu menentukan apakah perubahan kecepatan bersifat linear, mendekati linear, atau menunjukkan daerah jenuh pada nilai tertentu. Pengulangan pengukuran juga perlu dilakukan untuk memperoleh nilai rata-rata, simpangan, dan tingkat konsistensi. Tanpa pengulangan, perbedaan kecil dapat dipengaruhi oleh toleransi alat ukur, kondisi suplai, suhu komponen, atau variasi pembacaan tachometer. Oleh sebab itu, data penelitian saat ini tepat digunakan sebagai bukti fungsi dan kecenderungan awal, sedangkan pemodelan karakteristik yang lebih presisi memerlukan jumlah titik dan pengulangan yang lebih banyak.

Penelitian ini juga belum menyajikan variasi beban mekanis, pengukuran torsi, temperatur, kebisingan, dan getaran. Kecepatan 94.000 RPM yang dicapai pada PWM 2000 menunjukkan kemampuan putaran motor dalam konfigurasi pengujian, tetapi tidak langsung menggambarkan kemampuan motor ketika menggerakkan beban nyata. Penambahan beban dapat menurunkan kecepatan, meningkatkan arus, dan mengubah stabilitas sistem. Pengujian dengan dynamometer atau mekanisme beban terkontrol akan memungkinkan perhitungan torsi, daya mekanis, dan efisiensi. Temperatur motor serta ESC perlu dicatat pada pengujian berdurasi panjang untuk menentukan batas operasi yang aman. Getaran juga penting karena putaran tinggi dapat memperbesar ketidakseimbangan mekanis. Dengan memperluas parameter tersebut, analisis tidak hanya menjelaskan hubungan PWM dan RPM, tetapi juga menilai keamanan, efisiensi, dan ketahanan sistem.

Aspek kendali pada penelitian ini masih bersifat open-loop karena nilai PWM diberikan oleh pengguna tanpa umpan balik otomatis untuk mempertahankan kecepatan target. Pada kondisi beban berubah, kecepatan motor dapat menurun walaupun nilai PWM tetap. Sistem closed-loop dapat dibangun dengan menggunakan sensor kecepatan dan algoritma PI atau PID agar ESP32 menyesuaikan PWM berdasarkan selisih antara kecepatan target dan kecepatan aktual. Penggunaan kontrol PI untuk mengurangi error keadaan tunak pada motor BLDC telah menjadi perhatian dalam penelitian terdahulu [14]. Perbandingan open-loop dan closed-loop akan memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai ketepatan kendali, overshoot, waktu tunak, dan kemampuan menolak gangguan beban. Oleh karena itu, sistem yang dikembangkan saat ini dapat dipandang sebagai fondasi perangkat keras dan komunikasi untuk pengembangan kendali tertutup pada tahap berikutnya.

3.9. Arah Pengembangan Sistem

Pengembangan pertama yang dapat dilakukan adalah menambahkan modul pemantauan dan pencatatan data secara otomatis. Nilai PWM, arus, daya, tegangan, kecepatan, dan temperatur dapat ditampilkan pada halaman web serta disimpan dengan penanda waktu. Data historis memungkinkan pengguna membandingkan performa motor pada berbagai kondisi dan mendeteksi perubahan yang mengarah pada gangguan. Grafik waktu nyata juga membantu operator melihat respons motor setelah nilai PWM diubah. Penyimpanan dapat dilakukan pada memori lokal, kartu microSD, komputer dalam jaringan, atau basis data apabila sistem kemudian terhubung ke server. Fitur tersebut akan mengubah sistem dari pengendali sederhana menjadi platform monitoring dan analisis yang lebih lengkap.

Pengembangan kedua adalah penerapan umpan balik kecepatan dan proteksi berlapis. Sensor tachometer yang digunakan pada pengujian dapat digantikan atau dilengkapi sensor Hall, encoder, maupun sensor optik yang terhubung langsung ke ESP32. Data kecepatan aktual digunakan oleh algoritma kendali untuk mempertahankan setpoint ketika beban berubah. Pada saat yang sama, sensor arus dan suhu dapat digunakan untuk membatasi operasi. Apabila arus, suhu, atau kecepatan melebihi batas, sistem dapat menurunkan PWM, menghentikan motor, dan menampilkan peringatan. Mekanisme ini penting karena peningkatan nilai PWM terbukti diikuti kenaikan

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

arus dan daya yang cukup besar. Dengan integrasi tersebut, kinerja dan keselamatan sistem dapat ditingkatkan secara bersamaan.

Pengembangan ketiga berkaitan dengan validasi pada kondisi penggunaan yang lebih beragam. Pengujian perlu mencakup variasi beban, durasi operasi, jarak komunikasi, gangguan jaringan, dan beberapa perangkat pengguna. Selain itu, hasil pengukuran sebaiknya dibandingkan dengan alat ukur yang telah dikalibrasi dan dilakukan berulang untuk memperoleh ketidakpastian data. Uji ketahanan dapat dilakukan dengan mengoperasikan motor pada beberapa tingkat PWM dalam waktu tertentu sambil memantau suhu dan kestabilan tegangan. Evaluasi tersebut akan memperkuat kesimpulan mengenai keandalan sistem dan membantu menentukan batas operasi. Secara keseluruhan, prototipe yang dihasilkan telah membuktikan konsep kendali nirkabel berbasis ESP32, sedangkan pengembangan lanjutan diarahkan pada kendali tertutup, pencatatan data, proteksi, keamanan akses, dan pengujian yang lebih komprehensif.

3.10. Sintesis Temuan Penelitian

Secara sintesis, hasil penelitian menegaskan bahwa keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh kemampuan ESP32 menghasilkan sinyal PWM, tetapi oleh keterpaduan seluruh bagian sistem. Sumber daya menyediakan tegangan utama, buck converter menstabilkan suplai mikrokontroler, ESP32 menerima perintah melalui halaman web, ESC menerjemahkan sinyal menjadi pengaturan komutasi motor, dan alat ukur memberikan informasi performa. Apabila salah satu bagian tidak bekerja dengan baik, perubahan PWM belum tentu menghasilkan putaran yang stabil. Keterpaduan tersebut terlihat dari kemampuan sistem mempertahankan komunikasi ketika arus dan daya meningkat serta dari kecilnya perubahan tegangan pada seluruh rentang pengujian. Oleh karena itu, kontribusi penelitian ini terletak pada demonstrasi sistem kendali yang utuh, mulai dari antarmuka pengguna sampai respons aktuator, dengan komponen yang relatif sederhana dan dapat direplikasi.

Temuan mengenai kenaikan kecepatan yang disertai peningkatan arus dan daya juga menunjukkan adanya kompromi antara performa dan kebutuhan energi. Nilai PWM yang lebih tinggi memberikan kecepatan lebih besar, tetapi pengguna perlu memilih setpoint berdasarkan kebutuhan proses. Pengoperasian terus-menerus pada nilai maksimum tidak selalu menjadi pilihan terbaik apabila aplikasi hanya membutuhkan kecepatan menengah. Strategi operasi dapat dirancang dengan menetapkan beberapa mode, misalnya rendah, sedang, dan tinggi, disertai batas waktu pada mode maksimum. Apabila sensor umpan balik ditambahkan, pemilihan nilai PWM dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan beban dan kecepatan target. Pendekatan tersebut akan meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dan mengurangi tekanan termal pada komponen tanpa menghilangkan fleksibilitas kendali nirkabel.

Berdasarkan keseluruhan pembahasan, sistem telah memenuhi tujuan dasar untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC melalui jaringan Wi-Fi lokal dan memperlihatkan hubungan yang jelas antara PWM dan parameter performa. Namun, hasil ini harus ditempatkan sebagai tahap pengembangan prototipe. Validasi berikutnya perlu memastikan bahwa fungsi yang sama tetap stabil ketika motor diberi beban, dioperasikan dalam waktu lama, dan digunakan pada lingkungan dengan gangguan komunikasi. Pengembangan menuju sistem closed-loop, pencatatan data, proteksi suhu dan arus, autentikasi pengguna, serta tombol penghentian darurat akan memperluas kegunaan prototipe. Dengan tahapan tersebut, rancangan dapat berkembang dari alat demonstrasi menjadi sistem kendali yang lebih andal untuk pembelajaran, pengujian, maupun otomasi skala kecil.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengevaluasi sistem pengendalian kecepatan motor BLDC berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi fitur *local web server*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan nilai sinyal PWM pada rentang 1250–2000 yang dikendalikan melalui jaringan Wi-Fi lokal memberikan pengaruh yang berbanding lurus terhadap kinerja motor BLDC. Peningkatan nilai PWM menyebabkan arus listrik meningkat dari 1,1 A menjadi 4,2 A, daya listrik bertambah dari 13 W menjadi 50 W, serta kecepatan putaran motor naik dari 49.000 RPM hingga mencapai 94.000 RPM. Selain itu, sistem yang dirancang menunjukkan performa yang stabil dengan nilai penurunan tegangan yang sangat kecil, yaitu hanya 0,06 V pada kondisi operasi maksimum. Dengan demikian, penerapan sistem kendali berbasis jaringan nirkabel lokal ini memiliki potensi yang besar sebagai solusi pengendalian jarak jauh motor listrik yang efisien, responsif, dan berbiaya rendah tanpa memerlukan akses internet eksternal.

Referensi

[1] N. R. Bhosale, S. D. Shete, A. A. Gaikwad, and N. S. Patil, “Design and Development of a BLDC Motor Test Bench for Performance Evaluation,” pp. 654–663, 2026, doi: 10.48175/IJARSCT-32676. https://doi.org/10.48175/IJARSCT-32676

[2] F. Rohman and M. A. N. Huda, "Implementasi dan Analisis Kendali Kecepatan Motor BLDC 1 kW Tanpa Beban Menggunakan

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Algoritma PID," Jurnal ELTEK, vol. 17, no. 2, pp. 108-117, Okt. 2019. https://doi.org/10.33795/eltek.v17i2.157
[3] D. Harjono and W. Widodo, "Analisis Sistem Penggerak Motor BLDC Pada Mobil Listrik Ponecar," pp. 11–22. https://doi.org/10.47547/elit.v2i1.212
[4] R. Syawali and S. Meliala, "IoT-Based Three-Phase Induction Motor Monitoring System," pp. 12–18, 2023. https://doi.org/10.29103/jreece.v3i1.9811
[5] D. Hercog, T. Lerher, and M. Trunti˘, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," no. 1, 2023. https://doi.org/10.3390/s23156739
[6] S. Bhaganagare, S. Chavan, S. Gavali, and V. V Godase, "Voice-Controlled Home Automation with ESP32 : A Systematic Review of IoT-Based Solutions," vol. 2, no. 3, 2025. https://journal.matjournals.net/index.php/JoMMR/article/view/1888
[7] F. Jan, N. Min-allah, S. Saeed, S. Z. Iqbal, and R. Ahmed, "IoT-Based Solutions to Monitor Water Level , Leakage , and Motor Control for Smart Water Tanks," pp. 1–36, 2022. https://doi.org/10.3390/w14030309
[8] H. Yunus, M. Artiyasa, T. Elektro, F. Teknik, and U. N. Putra, "Perancangan dan Implementasi Meteran Air Digital Berbasis Internet of Things untuk Monitoring Real-Time dan Kontrol Aliran Air," vol. 5, no. 1, pp. 7468–7478, 2026. https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS/article/view/PERANCANGAN_METERAN_AIR
[9] A. O. S. Control and D. Acquisition, "An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED," 2024. https://doi.org/10.3390/en17102295
[10] M. S. Kurniawan and T. Permana, "Analisis Regenerative Braking Motor Listrik BLDC 10 KW Menggunakan Perekam Sinyal Mobil Listrik PW 6001-16," vol. 4, no. 2, pp. 1866–1873, 2026. https://journal.ilmudata.co.id/index.php/ijmst/article/view/REGENERATIVE_BRAKING
[11] A. Ainur, R. Sugeng, D. Riyanto, B. Dwi, and R. P. Pratama, "Image Processing untuk Deteksi Objek pada Daerah Bencana," vol. 20, no. 2, pp. 9–18, 2020, doi: 10.24036/invotek.v20i2.707. https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.707
[12] I. R. Afandi, D. Febriawan, A. Shifah, F. Faturohman, and F. Nazihah, "Aplikasi SIPEDRO 1 . 0 untuk pemantauan hidroponik dengan platform blynk terintegrasi ESP32 SIPEDRO 1 . 0 application for hydroponic monitoring with ESP 32 integrated blynk platform," vol. 10, pp. 71–81, 2023. https://jurnal.sttmcileungsi.ac.id/index.php/tekno/article/view/334
[13] K. T. Pambudi *et al.*, "PROTEKSI OVERHEAT PADA PENGENDALI MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT UNTUK BECAK LISTRIK DENGAN SENSOR SUHU MENGGUNAKAN," vol. 14, no. 1. http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v12i1.8981
[14] M. I. Mowaviq *et al.*, "INTEGRAL KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT," vol. 14, no. 1, pp. 512–518. http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v12i1.8461
[15] N. A. Jafar, H. Sulaiman, and A. N. Faizah, "Sistem Pemberian Informasi dari Kantor Desa ke Masjid Menggunakan Website Berbasis Mikrokontroler ESP32 pada Desa Dwitiro," vol. 5, no. 2, pp. 1300–1306, 2026. https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS/article/view/SISTEM_INFORMASI_ESP32

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.10318
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)