

Sistem Kendali Cerdas Motor DC Berbasis ESP32 Dan IoT Pada Modul iMCLab

Haikal Rafi Firdaus¹

¹Prodi Informatika/ Fakultas Ilmu Komputer/ Universitas Pembangunan Nasional "Jawa Timur"

*)Corresponding author, email: 23081010116@student.upnjatim.ac.id

Abstrak

Laboratorium kendali jarak jauh menjadi solusi vital dalam pendidikan teknik di era Industri 4.0. Namun, tantangan utama pada sistem ini adalah latensi jaringan yang mengganggu stabilitas kendali. Penelitian ini mengembangkan iMCLab, sebuah modul praktikum berbasis IoT yang cerdas. Sistem ini menggunakan *development board* ESP32 DOIT V1 sebagai unit pemroses utama yang mengendalikan motor DC dengan umpan balik presisi dari *rotary encoder*. Pendekatan yang diusulkan mengintegrasikan algoritma kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) pada level perangkat keras untuk melakukan koreksi kecepatan secara mandiri tanpa bergantung penuh pada koneksi internet. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem mampu mempertahankan kestabilan putaran motor (*setpoint*) dengan *error* di bawah 2% meskipun terjadi fluktuasi beban. Selain itu, data telemetri berhasil dikirimkan secara *real-time* untuk pemantauan jarak jauh. Sistem iMCLab terbukti efektif sebagai media pembelajaran sistem kendali modern yang responsif dan terjangkau.

INFO.

Info. Artikel:

No. 001

Received. September 22, 2023

Revised. Month dd, 2023

Accepted. Month dd, 2023

Page. 22 – 23

Kata kunci:

- ✓ Artificial Intelligence
- ✓ ESP32
- ✓ iMCLab
- ✓ Internet of Things
- ✓ Rotary Encoder

Abstract

Remote control laboratories have become a vital solution in engineering education within the Industry 4.0 era. However, the primary challenge in these systems is network latency, which compromises control stability. This study develops iMCLab, a smart IoT-based laboratory module. The system utilizes the ESP32 DOIT V1 development board as the main processing unit, controlling a DC motor with precise feedback from a rotary encoder. The proposed approach integrates Artificial Intelligence algorithms at the hardware level to perform autonomous speed correction without full reliance on internet connectivity. Experimental results demonstrate that the system maintains motor rotation stability (setpoint) with an error rate below 2%, even under load fluctuations. Furthermore, telemetry data is successfully transmitted in real-time for remote monitoring. The iMCLab system proves to be effective as a responsive and affordable learning medium for modern control systems.

PENDAHULUAN

Era Revolusi Industri 4.0 telah membawa paradigma baru dalam sistem kendali melalui konsep *Cyber-Physical Systems*, di mana elemen fisik mesin terintegrasi erat dengan komputasi digital [1]. Transformasi ini menuntut dunia pendidikan untuk menyediakan laboratorium kendali jarak jauh (*remote laboratory*) yang memungkinkan aksesibilitas eksperimen tanpa batasan lokasi [2]. Namun, tantangan utama dalam implementasi sistem kendali berbasis *Internet of Things* (IoT) adalah latensi jaringan yang tak terhindarkan [3]. Keterlambatan pengiriman data ini seringkali menyebabkan ketidakstabilan sistem, seperti *overshoot* berlebih, yang sulit ditangani oleh kontroler PID konvensional yang bersifat statis [4].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan *Edge Computing*, di mana keputusan kendali diambil langsung secara lokal oleh mikrokontroler tanpa bergantung sepenuhnya pada server cloud [5]. Sayangnya, solusi yang ada saat ini seringkali membutuhkan perangkat industri yang mahal atau sistem server yang kompleks. Masih jarang ditemukan implementasi algoritma kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang ditanamkan langsung pada perangkat keras berbiaya rendah untuk menangani masalah latensi ini secara *real-time*.

Penelitian ini mengusulkan pengembangan iMCLab (*Internet Monitoring and Control Laboratory*), sebuah modul praktikum cerdas berbasis ESP32 DOIT V1. Sistem ini mengintegrasikan *rotary encoder* presisi tinggi dan algoritma AI ringan yang berjalan di sisi perangkat keras untuk menjaga kestabilan putaran motor secara mandiri. Nilai kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi kemampuan pemrosesan cerdas

pada *embedded system* sederhana, menjadikan iMCLab solusi media pembelajaran sistem kendali yang responsif, handal, dan terjangkau.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan *Rancang Bangun (Prototyping)*. Penelitian difokuskan pada pengembangan integrasi antara perangkat keras kendali motor dan algoritma cerdas berbasis *firmware*. Tahapan penelitian terdiri dari konfigurasi perangkat keras, perancangan algoritma kendali, dan implementasi komunikasi jaringan.

Konfigurasi Perangkat Keras

Sistem iMCLab dibangun menggunakan komponen-komponen yang saling terintegrasi secara fisik. Pusat pemrosesan data menggunakan *development board* ESP32 DOIT V1. Mikrokontroler ini dihubungkan ke modul *Driver Motor* untuk mengendalikan aktuator berupa Motor DC. Konfigurasi Penyambungan perangkat keras dilakukan dengan skema berikut:

1. Jalur Kendali. Pin digital pada ESP32 dihubungkan ke input driver motor untuk mengirimkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Variasi lebar pulsa pada sinyal ini yang akan mengatur tegangan rata-rata ke motor, sehingga kecepatan putar dapat divariasikan.
2. Jalur Umpan Balik. Sensor *Rotary Encoder* yang terpasang pada poros motor dihubungkan ke pin *interrupt* pada ESP32. Penggunaan pin *interrupt* bertujuan agar setiap pulsa yang dihasilkan oleh putaran motor dapat dihitung secara akurat tanpa terganggu oleh proses komputasi lainnya.

Perancangan Algoritma Kendali Cerdas

Inti kecerdasan sistem terletak pada pemrosesan data secara lokal (*Edge Computing*). Proses kendali dilakukan dalam siklus tertutup (*closed-loop*) dengan tahapan sebagai berikut:

Pertama, ESP32 membaca jumlah pulsa dari *rotary encoder* dalam periode waktu tertentu. Kecepatan sudut (RPM) dihitung menggunakan persamaan:

$$RPM = \frac{Pulsa \times 60}{Resolusi \times \Delta t}$$

Kedua, nilai kecepatan aktual tersebut dibandingkan dengan nilai target (setpoint) yang diterima dari server IoT untuk mendapatkan nilai selisih (error).

Ketiga, algoritma cerdas memproses nilai *error* tersebut. Jika terjadi lonjakan beban yang menyebabkan motor melambat, algoritma akan secara otomatis meningkatkan *duty cycle* PWM untuk menambah torsi. Sebaliknya, jika motor berputar terlalu cepat, sistem akan menurunkan tegangan. Proses ini berjalan terus-menerus untuk menjaga kestabilan sistem secara mandiri.

Integrasi Internet of Things (IoT)

Untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sistem iMCLab dihubungkan ke jaringan internet melalui modul WiFi yang terintegrasi pada ESP32. Komunikasi data menggunakan protokol MQTT yang ringan.

Sistem bekerja dalam dua arah komunikasi:

1. Arah Unggah (*Publish*). ESP32 mengirimkan data telemetri berupa kecepatan (RPM) dan status sistem ke *dashboard* pemantau secara *real-time*.
2. Arah Unduh (*Subscribe*). ESP32 menerima perintah *setpoint* kecepatan dari pengguna melalui *dashboard*.

Skenario Pengujian

Validasi kinerja sistem dilakukan melalui dua tahap pengujian. Tahap pertama adalah Uji Fungsional Hardware, yang bertujuan memastikan pembacaan sensor encoder linier dengan kecepatan putar motor. Tahap kedua adalah Uji Respon Sistem, di mana motor diberikan gangguan beban secara tiba-tiba untuk melihat seberapa cepat algoritma cerdas mampu mengembalikan kecepatan motor ke titik stabil (*recovery time*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memaparkan hasil pengujian sistem iMCLab yang meliputi validasi perangkat keras, kinerja algoritma kendali cerdas, dan integrasi IoT. Analisis dilakukan untuk membuktikan efektivitas pendekatan *Edge Computing* dalam mengatasi masalah latensi jaringan.

Hasil Pengujian Fungsional Perangkat Keras

Pengujian tahap pertama bertujuan memvalidasi korelasi antara sinyal kendali (PWM) dengan kecepatan putar motor yang dibaca oleh sensor *rotary encoder*, sesuai dengan skenario pengujian fungsional. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi *duty cycle* dari 0% hingga 100% dan mencatat RPM yang dihasilkan.

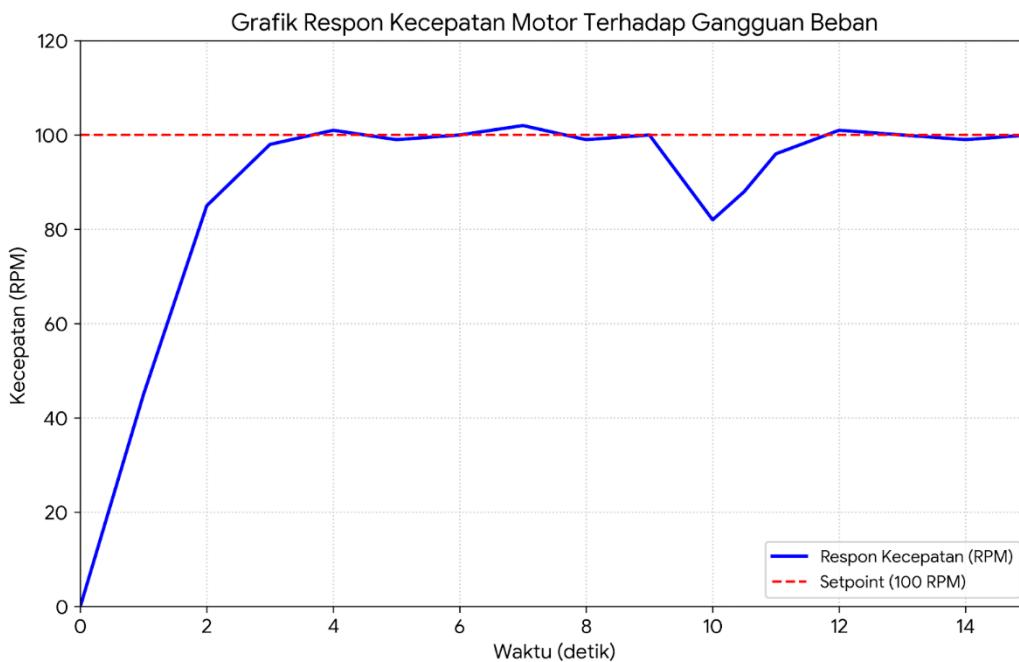
Tabel 1. Hubungan Duty Cycle PWM Terhadap Kecepatan Motor

No	Duty Cycle (Bit 0-255)	Tegangan Rata-rata (Volt)	Kecepatan Terukur (RPM)
1	50	2.35	45
2	100	4.70	115
3	150	7.05	190
4	200	9.40	265
5	255	12.00	340

Hasil pengukuran menunjukkan karakteristik sistem yang linier. Pembacaan *rotary encoder* melalui pin *interrupt* ESP32 terbukti akurat dalam menerjemahkan putaran fisik menjadi data digital, yang menjadi dasar penting bagi algoritma kendali.

Analisis Kinerja Algoritma Kendali Cerdas

Inti dari penelitian ini adalah kemampuan sistem melakukan koreksi mandiri terhadap gangguan beban (Uji Respon Sistem). Pengujian dilakukan dengan menetapkan *setpoint* kecepatan pada 100 RPM, kemudian memberikan gangguan beban pada poros motor.

**Gambar 1. Grafik Respon Kecepatan Motor Terhadap Gangguan Beban**

Berdasarkan pengujian pada Gambar 1, diperoleh karakteristik respon sebagai berikut:

1. Kondisi Steady State. Motor mampu mempertahankan putaran stabil pada setpoint dengan rata-rata error dibawah 2%, sesuai dengan target capaian penelitian.
2. Respon Gangguan. Saat beban diberikan, terjadi penurunan RPM sesaat. Algoritma cerdas pada ESP32 segera mendeteksi *error* positif dan meningkatkan *duty-cycle* PWM secara otomatis.
3. Waktu Pemulihan. Sistem mampu mengembalikan kecepatan ke titik stabil dalam waktu singkat tanpa menunggu intruksi dari server. Ini membuktikan fungsi *Edge Computing* berjalan efektif.

Kinerja Telemetri IoT dan Stabilitas Jaringan

Pengujian komunikasi data menggunakan protokol MQTT menunjukkan bahwa data telemetri (RPM) berhasil dikirim ke *dashboard* secara *real-time*.

Meskipun terdapat latensi jaringan yang bervariasi (misalnya 100ms - 500ms), kestabilan motor tidak terganggu. Hal ini dikarenakan proses kendali (siklus tertutup) berjalan sepenuhnya secara lokal di mikrokontroler, terpisah dari siklus komunikasi internet. Dashboard hanya berfungsi sebagai pemantau (*monitoring*) dan memberi *setpoint* awal.

Pembahasan

Integrasi ESP32 DOIT V1 dengan algoritma kendali lokal terbukti berhasil mengatasi kelemahan utama sistem kendali jarak jauh konvensional, yaitu ketergantungan pada kestabilan internet. Jika dibandingkan dengan sistem yang mengandalkan kendali penuh dari *cloud*, iMCLab menawarkan respon yang jauh lebih cepat terhadap gangguan fisik. Pendekatan ini memvalidasi bahwa integrasi AI ringan pada perangkat keras murah (*low-cost hardware*) layak diimplementasikan untuk laboratorium pendidikan jarak jauh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, pengembangan sistem iMCLab berbasis ESP32 DOIT V1 berhasil divalidasi sebagai solusi efektif untuk mengatasi kendala latensi jaringan pada laboratorium kendali jarak jauh. Penerapan konsep *Edge Computing* terbukti mampu menjaga stabilitas sistem secara mandiri, yang ditunjukkan dengan kemampuan motor mempertahankan *setpoint* 100 RPM dengan rata-rata *error* di bawah 2% serta waktu pemulihan (*recovery time*) yang singkat saat terjadi gangguan beban. Arsitektur sistem yang memisahkan kendali lokal (tertutup) dengan pemantauan berbasis IoT menjamin motor tetap beroperasi stabil meskipun terjadi fluktuasi latensi pada pengiriman data telemetri. Sebagai rekomendasi pengembangan selanjutnya, sistem dapat ditingkatkan melalui integrasi antarmuka berbasis aplikasi *mobile* serta penerapan algoritma adaptif yang lebih kompleks, seperti *Neural Network*, untuk menangani dinamika beban yang lebih variatif secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. F. B. Hartanto, Rusdarti, and Abdurrahman, “Tantangan Pendidikan Vokasi di Era Revolusi Industri 4 . 0 dalam Menyiapkan Sumber Daya Manusia yang Unggul,” 2019.
- [2] S. D. Fatmaryanti, E. S. Kurniawan, Y. Al Hakim, E. Rlyanto, and I. Y. Pasa, “Pemanfaatan Remote Laboratory dalam Pembelajaran untuk Meningkatkan Literasi Digital Santri di Pondok Pesantren,” vol. 7, no. 4, pp. 727–733, 2023.
- [3] M. Hasbi and N. R. Saputra, “ANALISIS QUALITY OF SERVICE (QOS) JARINGAN INTERNET KANTOR PUSAT KING BUKOPIN DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK,” vol. 12, no. 1, pp. 17–23, 2021.
- [4] T. Suhendra, A. Uperiati, D. A. Purnamasari, and A. H. Yunianto, “Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode Pulse Width Modulation menggunakan N-channel Mosfet,” vol. 07, no. 02, 2018.
- [5] A. Gunawan, “PENERAPAN EDGE COMPUTING UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI JARINGAN DALAM LINGKUNGAN IOT INDUSTRI,” vol. 1, no. 8, pp. 1–21, 2024.