

## Rancang Bangun Modul Kontrol Berbasis PID untuk Pengaturan Kecepatan dan Posisi Motor DC Menggunakan STM32 dan Rotary Encoder

**Doris Juarsa<sup>1</sup>, Muhammad Fadli<sup>2</sup>, Erliyan Redy Susanto<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>Magister Ilmu Komputer, Fakultas Teknik dan Teknologi, Universitas Teknokrat Indonesia, Bandar Lampung, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Ekonomi dan Bisnis, Pengelolaan Perhotelan, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

Email: <sup>1</sup>doris\_juarsa@teknokrat.ac.id, <sup>2\*</sup>muhammadfadliofficial@polinela.ac.id,

<sup>3</sup>erliyan.redy@tenokrat.ac.id

### **Abstract**

*Precision control of DC motors in industrial and robotics applications is often compromised by external loads and the limitations of open-loop systems, which cause instability in rotational speed and angular position. This study aims to design and build a PID-based intelligent control module for integrated DC motor speed and position control using an STM32F103C8T6 microcontroller and a rotary encoder as feedback. This system is designed as a closed-loop system to reduce the error between the setpoint and the actual value. Tests were conducted under no-load and with-load conditions at various speed setpoints (10–30 RPM) and angular changes (slow and fast). The results show that the system is able to stabilize motor performance with an average speed error of  $-0.3033$  and  $0.2766$  RPM (no-load) for Motors A and B, and  $0.2633$  and  $3.47$  RPM (with-load). For angular position control, the average errors were  $0.69^\circ$  and  $0.895^\circ$  (without load), and  $0.475^\circ$  and  $0.335^\circ$  (with load). These findings demonstrate the effectiveness of the PID-based intelligent control module in improving system accuracy and stability. This system offers a compact and practical solution for industrial automation and robotics applications requiring precise motor control.*

**Keywords:** PID Control, DC Motor, STM32, Rotary Encoder, Closed-Loop System, Intelligent Control Module.

### **Abstrak**

Kontrol presisi motor DC dalam aplikasi industri dan robotika sering terganggu oleh beban eksternal dan keterbatasan sistem open-loop, yang menyebabkan ketidakstabilan kecepatan putar dan posisi sudut. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun modul kontrol cerdas berbasis PID untuk pengaturan kecepatan dan posisi motor DC secara terintegrasi menggunakan mikrokontroler STM32F103C8T6 dan rotary encoder sebagai umpan balik. Sistem ini dirancang sebagai sistem loop tertutup untuk mengurangi error antara setpoint dan nilai aktual. Pengujian dilakukan dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban pada berbagai setpoint kecepatan (10–30 RPM) dan perubahan sudut (perlahan dan cepat). Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menstabilkan kinerja motor dengan rata-rata error kecepatan sebesar  $-0,3033$  dan  $0,2766$  RPM (tanpa beban) untuk Motor A dan B, serta  $0,2633$  dan  $3,47$  RPM (dengan beban). Untuk kontrol posisi sudut, rata-rata error adalah  $0,69^\circ$  dan  $0,895^\circ$  (tanpa beban), dan  $0,475^\circ$  dan  $0,335^\circ$  (dengan beban). Temuan ini membuktikan efektivitas modul kontrol cerdas berbasis PID dalam meningkatkan akurasi dan stabilitas sistem. Sistem ini menawarkan solusi kompak dan praktis untuk aplikasi otomasi industri dan robotika yang membutuhkan kontrol motor presisi.

**Kata Kunci:** Kontrol PID, Motor DC, STM32, Rotary Encoder, Sistem Loop Tertutup, Modul Kontrol Cerdas.

## 1. PENDAHULUAN

Motor DC atau motor arus searah merupakan salah satu komponen paling vital dalam sistem otomasi, industri, dan robotika karena kemudahan dalam mengatur kecepatan dan arah putaran, serta torsi awal yang tinggi (Yulianto et al., 2024). Motor ini banyak digunakan dalam conveyor belt, lift, dan sebagai aktuator pada robot. Namun, dalam konfigurasi *open-loop*, kinerja motor sangat rentan terhadap gangguan beban, yang menyebabkan penurunan kecepatan dan ketidakakuratan posisi poros. Tanpa umpan balik, sistem tidak dapat melakukan koreksi otomatis, sehingga kinerjanya tidak stabil.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, diperlukan sistem kontrol *loop* tertutup (*closed-loop*) yang menggunakan umpan balik dari sensor untuk membandingkan nilai aktual dengan setpoint, lalu menghasilkan sinyal koreksi (Ma'arif, 2021). Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) adalah salah satu metode paling populer karena kemampuannya menggabungkan respons cepat (P), menghilangkan error tetap (I), dan meredam osilasi (D). Implementasi kontrol PID pada mikrokontroler seperti STM32 telah terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas kecepatan motor (Murtono & Kamajaya, 2021; Thai & Kieu, 2022).

Namun, banyak sistem yang ada masih menggunakan konfigurasi terpisah antara mikrokontroler, *driver*, dan sensor, sehingga membutuhkan banyak kabel dan ruang. Selain itu, sebagian besar penelitian hanya fokus pada kontrol kecepatan atau posisi, bukan keduanya secara terintegrasi (Bitriá & Palacín, 2022). Hal ini menciptakan gap penelitian dalam pengembangan sistem kontrol motor DC yang kompak, terintegrasi secara fisik, dan mampu melakukan *dual-mode control* (kecepatan dan posisi).

Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan merancang dan membangun modul kontrol cerdas terintegrasi yang menggabungkan mikrokontroler STM32F103C8T6, driver motor VN2SP30, dan antarmuka rotary encoder dalam satu modul PCB. Sistem ini mampu melakukan kontrol kecepatan dan posisi sudut secara real-time menggunakan algoritma PID. Kontribusi utama penelitian ini adalah:

1. Desain dan implementasi modul kontrol cerdas terintegrasi untuk motor DC.
2. Implementasi kontrol PID dual-mode (kecepatan dan posisi) dalam satu sistem.
3. Validasi kinerja sistem di bawah kondisi tanpa beban dan dengan beban.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan efisien untuk aplikasi industri dan pendidikan yang membutuhkan kontrol motor presisi dengan bentuk fisik yang minimalis.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian ini didasarkan pada kerangka teori dan teknologi yang telah berkembang dalam bidang kontrol motor DC, khususnya sistem close loop berbasis mikrokontroler dan sensor feedback. Bagian ini membahas konsep dasar, penelitian terdahulu, dan identifikasi gap penelitian.

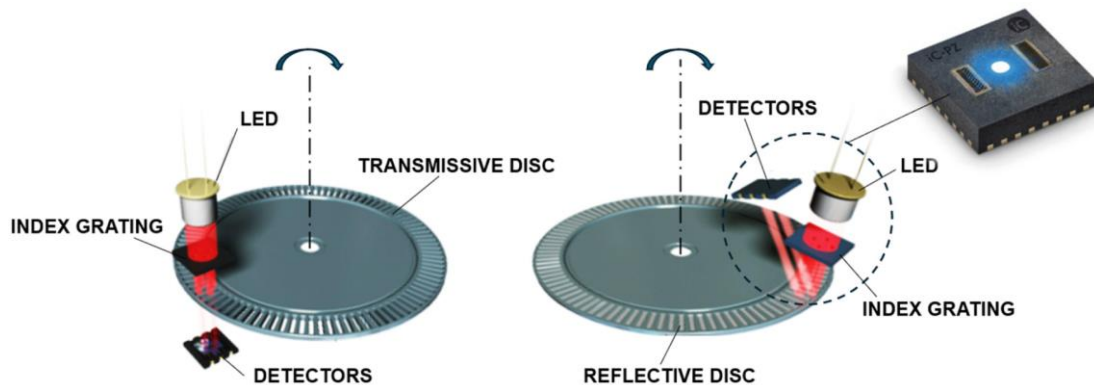
### 2.1 Sistem Kontrol Close Loop

Sistem kontrol loop tertutup (*closed-loop system*) merupakan solusi utama untuk mengatasi keterbatasan sistem open loop, di mana keluaran sistem tidak memengaruhi sinyal kontrol. Dalam sistem loop tertutup, sinyal keluaran (*process variable*) diukur oleh sensor dan dibandingkan dengan nilai yang diinginkan (*set point*) untuk menghasilkan sinyal error. Sinyal error ini kemudian diproses oleh kontroler untuk menghasilkan sinyal koreksi yang dikirim ke aktuator (motor), sehingga sistem dapat secara otomatis

mengurangi *error* dan menjaga stabilitas kinerja (Ma'arif, 2021) . Pendekatan ini sangat efektif dalam menjaga kestabilan kecepatan motor DC meskipun terjadi gangguan beban.

## 2.2 Rotary Encoder sebagai Sensor Umpan Balik

Rotary encoder adalah sensor yang digunakan untuk mengukur posisi sudut dan kecepatan putar poros motor. Jenis yang paling umum digunakan dalam aplikasi kontrol presisi adalah quadrature encoder, yang menghasilkan dua sinyal digital (A dan B) dengan perbedaan fase 90 derajat. Dengan menganalisis urutan dan fase kedua sinyal ini, mikrokontroler dapat menentukan arah putaran serta menghitung jumlah pulsa per putaran (PPR), yang kemudian dikonversi menjadi kecepatan (RPM) atau posisi sudut (derajat). Resolusi tinggi dari encoder memungkinkan kontrol yang sangat presisi, terutama dalam aplikasi robotika dan otomasi industri (Gurauskis et al., 2024).



Gambar 1. Prinsip Kerja Rotary Encoder  
Sumber : (Gurauskis et al., 2024)

## 2.3 Algoritma Kontrol PID

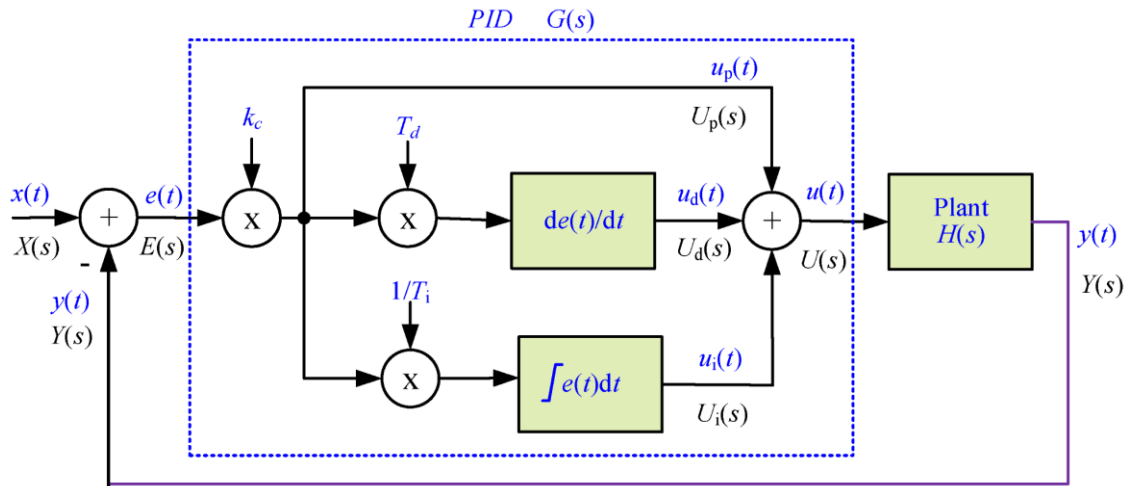
Kontroler Proporsional-Integral-Derivatif (PID) adalah salah satu metode kontrol yang paling luas digunakan karena kesederhanaan dan efektivitasnya. Kontroler ini menghasilkan sinyal kontrol ( $u(t)$ ) berdasarkan kombinasi tiga komponen:

1. Proporsional (P): Merespons kesalahan saat ini.
2. Integral (I): Menghilangkan error steady-state dengan mengakumulasi error dari waktu ke waktu.
3. Derivatif (D): Meramalkan error masa depan berdasarkan laju perubahan error, sehingga meredam osilasi.

Secara matematis, algoritma PID dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Kinerja sistem sangat bergantung pada tuning parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Metode tuning seperti Ziegler-Nichols sering digunakan, namun rentan terhadap overshoot. Pendekatan modern seperti Genetic Algorithm (GA) atau Particle Swarm Optimization (PSO) telah terbukti lebih efektif dalam mengoptimalkan parameter PID (Rashid & Hussain, 2021; Yıldırım et al., 2024). Studi oleh (Al-Mahasneh & Maghari, 2020) menunjukkan bahwa GA mampu mengurangi settling time dan overshoot secara signifikan. Selain itu, implementasi PID pada sistem embedded telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi, termasuk kontrol motor DC (Manuel et al., 2023; Sozański, 2023)



Gambar 2. Prinsip Kerja Rotary Encoder  
Sumber : (Sozański, 2023)

## 2.4 Implementasi Kontrol PID pada Mikrokontroler STM32

Mikrokontroler STM32, khususnya seri F103C8T6, telah menjadi pilihan populer dalam sistem kontrol *real-time* karena arsitektur ARM Cortex-M3, frekuensi tinggi (72 MHz), dan dukungan *timer* yang kuat untuk pembacaan encoder. Studi oleh (Thai & Kieu, 2022) berhasil mengimplementasikan kontrol PID *real-time* untuk motor DC menggunakan STM32F407, menunjukkan peningkatan stabilitas kecepatan. (Pop, 2022) juga menunjukkan bahwa STM32 dapat membaca kecepatan *encoder* secara akurat menggunakan *interrupt timer*. (Prayogo et al., 2023) memanfaatkan STM32F103C8T6 untuk kontrol motor BLDC dengan *feedback quadrature encoder*, membuktikan kemampuannya dalam aplikasi kontrol presisi. (Zhang & Wang, 2023) mengembangkan modul kontrol kompak untuk robotika menggunakan STM32, yang meningkatkan keandalan sistem. Sementara itu, (Suman & Gupta, n.d.) menunjukkan bahwa STM32 efektif untuk kontrol kecepatan motor BLDC dalam sistem *close loop*.

## 2.5 Integrasi Modul Elektronika untuk Sistem Kontrol Cerdas

Selain integrasi perangkat keras, tren terkini juga menunjukkan pentingnya optimasi algoritma kontrol untuk meningkatkan kinerja sistem. (Chen et al., 2023) berhasil mengimplementasikan kontrol posisi *real-time* menggunakan *encoder quadrature* dan *timer* STM32, membuktikan akurasi tinggi dalam aplikasi presisi. Selain itu, penggunaan algoritma optimasi seperti *Genetic Algorithm* (GA) telah terbukti efektif dalam menemukan parameter PID optimal (Al-Mahasneh & Maghari, 2020). Pendekatan lain seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) juga menunjukkan hasil yang superior dibandingkan *tuning manual* (Yıldırım et al., 2024). Untuk aplikasi pendidikan, (Pradana et al., 2023), (Prayogo et al., 2023) merancang modul driver motor miniatur yang mudah digunakan. Sementara itu, (Rahman & Hossain, 2022) melakukan studi komparatif terhadap berbagai metode *tuning* PID, memberikan panduan praktis bagi peneliti. Integrasi sistem kontrol berbasis STM32 terus berkembang, dengan fokus pada keandalan, efisiensi, dan skalabilitas (Lee & Park, 2021; Li & Liu, 2021).

## 2.6 Inovasi Terkini dalam Modul Kontrol Motor Cerdas

Penelitian terbaru menunjukkan tren kuat dalam pengembangan modul kontrol motor yang kompak dan cerdas. (Firdaus et al., 2022) merancang prototipe sistem kendali kecepatan motor DC berbasis PID dengan *tuning* Ziegler-Nichols, membuktikan efektivitas pendekatan empiris. (Gupta & Singh, 2023) mengembangkan kontroler PID

kompak menggunakan STM32 untuk regulasi kecepatan, menekankan pentingnya miniaturisasi. (Rahman & Hossain, 2022) menggabungkan logika fuzzy dengan STM32 untuk kontrol kecepatan *real-time*, menunjukkan alternatif dari kontrol PID konvensional. (Islam et al., 2022) merancang modul terintegrasi untuk aplikasi robotika, yang sejalan dengan tujuan penelitian ini. (Kurniawan et al., 2023) mengembangkan kontroler motor cerdas berbiaya rendah untuk otomasi industri. (Nguyen & Le, 2022), fokus pada kontrol posisi presisi menggunakan *feedback encoder quadrature*. Patel & (Patel & Desai, 2023) melakukan studi komparatif kontrol kecepatan motor DC menggunakan STM32F103C8T6. (Gupta & Singh, 2023) menunjukkan bahwa kontroler motor cerdas dapat dibuat dengan biaya rendah tanpa mengorbankan kinerja. (Wang et al., 2023) dan (Zhang & Wang, 2023) mengembangkan modul kontrol terintegrasi untuk *robot mobile* dan sistem robotika, membuktikan bahwa integrasi perangkat keras meningkatkan keandalan dan skalabilitas sistem.

## 2.7 Identifikasi Gap Penelitian

Meskipun banyak penelitian telah mengimplementasikan kontrol PID untuk motor DC menggunakan STM32 dan encoder, masih terdapat beberapa gap penelitian yang belum terpenuhi:

1. Fokus Tunggal: Sebagian besar penelitian hanya fokus pada kontrol kecepatan atau posisi, bukan keduanya secara terintegrasi dalam satu sistem.
2. Kompleksitas Perangkat Keras: Konfigurasi sistem masih menggunakan banyak komponen terpisah (mikrokontroler, driver, encoder), membutuhkan banyak kabel dan ruang.
3. Kurangnya Modul Terintegrasi: Belum ada modul kontrol cerdas yang menggabungkan mikrokontroler, driver motor, dan antarmuka encoder dalam satu PCB kompak untuk aplikasi dual-mode.

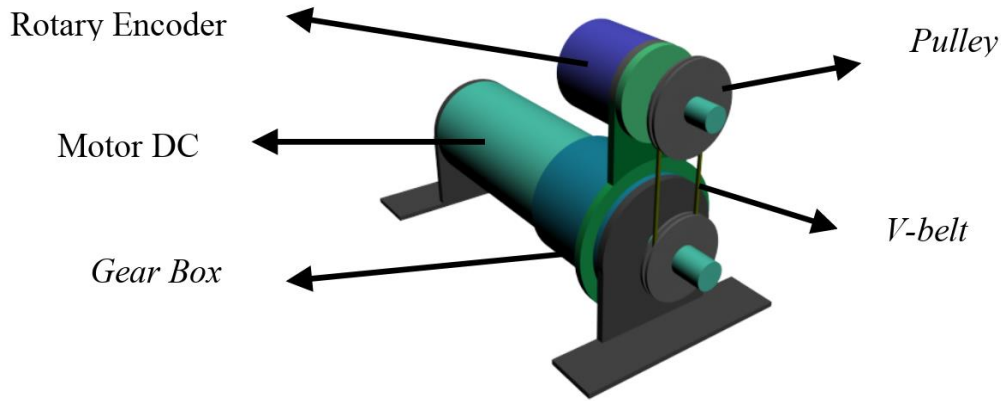
Oleh karena itu, penelitian ini mengisi gap tersebut dengan merancang dan membangun modul kontrol cerdas terintegrasi yang mampu melakukan kontrol kecepatan dan posisi sudut secara bersamaan dalam satu modul PCB, meningkatkan praktikalitas dan skalabilitas sistem.

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen rekayasa (engineering experiment) untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji kinerja modul kontrol cerdas berbasis PID untuk motor DC. Metodologi dilakukan secara sistematis melalui tahapan perancangan, implementasi, dan pengujian.

### 3.1 Desain Sistem

Sistem dirancang sebagai sistem kontrol loop tertutup. Sinyal set point (kecepatan atau posisi sudut) diberikan melalui potensiometer pada mikrokontroler master. Sinyal umpan balik diperoleh dari rotary encoder yang terhubung ke poros motor. Mikrokontroler STM32F103C8T6 membaca sinyal encoder, menghitung *error*, dan menerapkan algoritma PID untuk menghasilkan sinyal PWM yang mengendalikan motor melalui driver VNH2SP30. Data hasil pengujian dikirim secara *real-time* ke komputer melalui modul Bluetooth HC-05.



Gambar 3. Desain 3D Peletakan Sensor  
Sumber : Penulis (2025)

### 3.2 Bahan dan Komponen

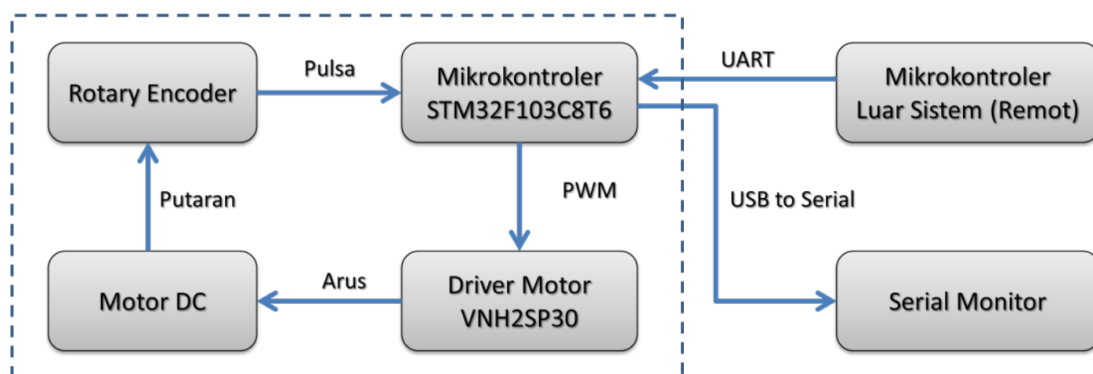
Tabel 1. Bahan dan Komponen

| KOMPONEN       | SPESIFIKASI                             |
|----------------|-----------------------------------------|
| Mikrokontroler | STM32F103C8T6 (ARM Cortex-M3, 72 MHz)   |
| Driver Motor   | VNH2SP30 (Dual H-Bridge, 14V, 30A peak) |
| Rotary Encoder | Magnetic Quadrature Encoder (1000 PPR)  |
| Motor DC       | 2 unit, 12V, 3000 RPM                   |
| Power Supply   | 12V DC, 5A                              |
| Beban          | Flywheel 0.5 kg                         |

Sumber : Penulis (2025)

### 3.3 Arsitektur Perangkat Keras

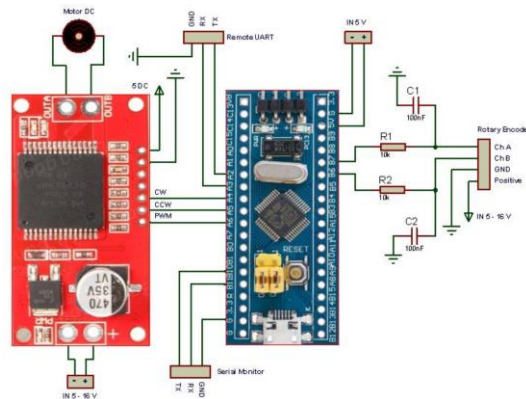
Arsitektur elektronika sistem menggambarkan hubungan antara semua komponen utama.



Gambar 4. Desain Arsitektur Elektronika  
Sumber : Penulis (2025)

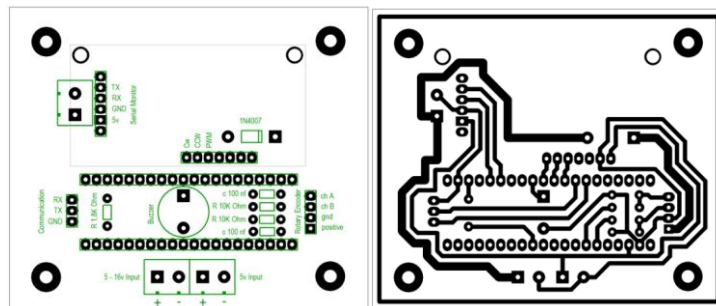
### 3.4 Desain Skematik dan PCB

Untuk meminimalkan kesalahan perakitan dan meningkatkan keandalan, modul elektronika dirancang sebagai PCB terintegrasi.

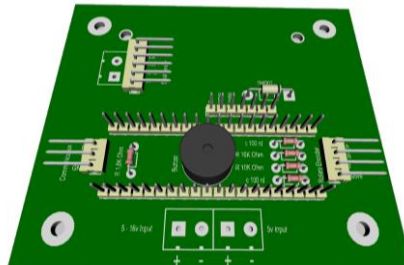


Gambar 5. Desain Skematik Rangkaian Elektronika  
 Sumber : Penulis (2025)

Dibutuhkan desain untuk membuat modul smart control yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan dalam perakitan komponen. Berikut desain dalam bentuk 2D dan 3D.



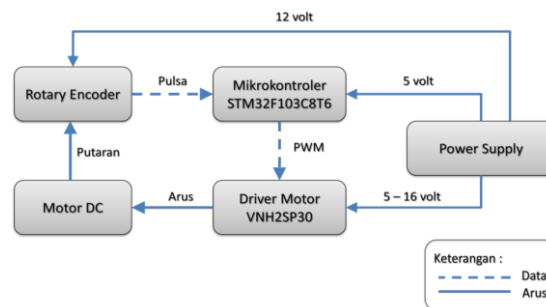
Gambar 6. Desain 2D PCB Layout Module  
 Sumber : Penulis (2025)



Gambar 7. Desain 3D PCB Layout Module  
 Sumber : Penulis (2025)

### 3.5 Diagram Blok Sistem

Diagram blok menjadi acuan utama dalam perakitan dan pemrograman sistem.



Gambar 8. Diagram Blok Koneksi Modul Elektronika  
 Sumber : Penulis (2025)



### 3.6 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam dua skenario utama: kontrol kecepatan dan kontrol perubahan sudut.

1. Hubungkan mikrokontroler master ke mikrokontroler slave melalui UART.
2. Hubungkan modul Bluetooth HC-05 (slave) ke komputer.
3. Hubungkan power supply 12V ke mikrokontroler master dan slave.
4. Buka software serial monitor di komputer.
5. Atur set point kecepatan atau posisi sudut menggunakan potensiometer pada mikrokontroler master.
6. Rekam data error (selisih set point dan nilai aktual) selama 30 detik.
7. Ulangi pengujian untuk setiap kombinasi set point dan kondisi (tanpa beban dan dengan beban).

### 3.7 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam dua skenario utama: kontrol kecepatan dan kontrol perubahan sudut.

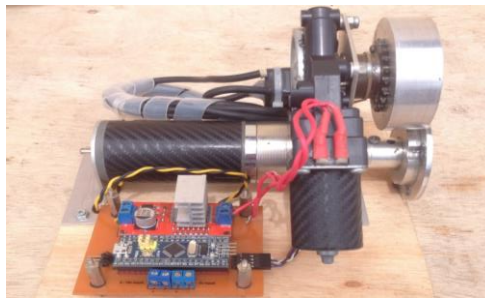
1. Rata-rata error: Indikator akurasi sistem.
2. Error maksimum dan minimum: Indikator stabilitas dan osilasi.
3. Perbandingan performa antara kondisi tanpa beban dan dengan beban.

Data dari serial monitor diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menghasilkan grafik dan tabel rangkuman.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Perancangan dan Implementasi Perangkat Keras

Sistem kontrol cerdas berhasil diimplementasikan secara fisik sesuai desain. Modul PCB yang terintegrasi memungkinkan pemasangan yang rapi dan mengurangi risiko kesalahan kabel. Sistem dapat langsung dipasang pada motor DC dan diuji.



Gambar 9. Sistem Smart Kontrol Motor DC  
Sumber : Penulis (2025)

### 4.2 Hasil Pengujian Kecepatan

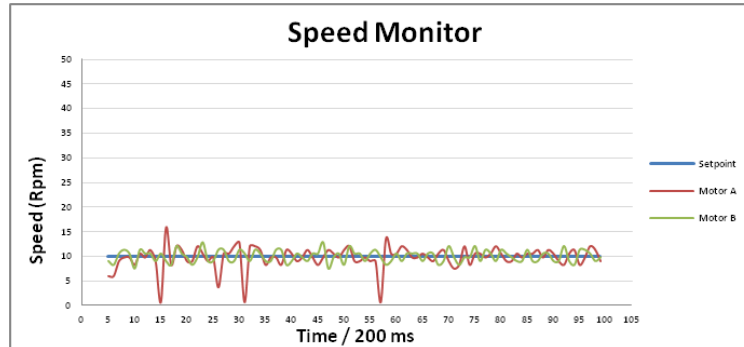
Bagian ini meliputi alat pengujian, prosedur pengujian, pengujian kecepatan, pengujian perubahan sudut, dan rangkuman hasil pengujian.

Adapun prosedur yang harus diperhatikan dalam pengujian dan pengambilan data, berikut urutan dari prosedur pengujian:

1. Hubungkan Mikrokontroler Master ke Mikrokontroler Slave dengan jalur komunikasi UART.
2. Hubungkan Module Bluetooth HC-05 Slave ke PC.
3. Hubungkan mikrokontroler master dan slave ke *power supply*.
4. Buka *serial monitor* pada PC.
5. *Tuning speed* dengan potensiometer yang terdapat pada mikrokontroler master.

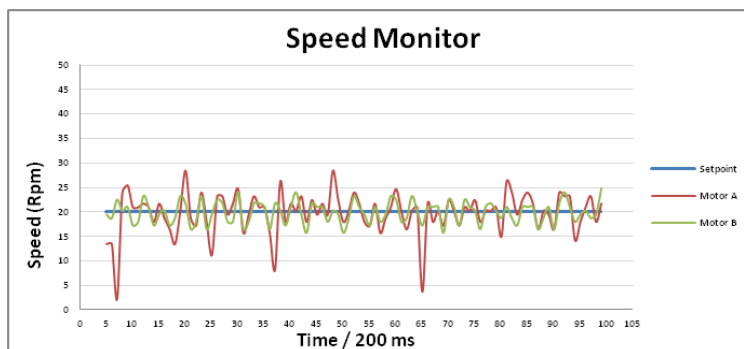


Pengujian kecepatan dilakukan dengan tanpa beban dan menggunakan beban dengan beberapa variasi *set point* yang diberikan. Pengujian ini dilakukan terhadap dua motor DC yang berbeda yang digambarkan dalam satu grafik garis, di mana garis biru adalah *set point*, garis merah adalah *error* motor A, dan garis oranye adalah *error* Motor B.



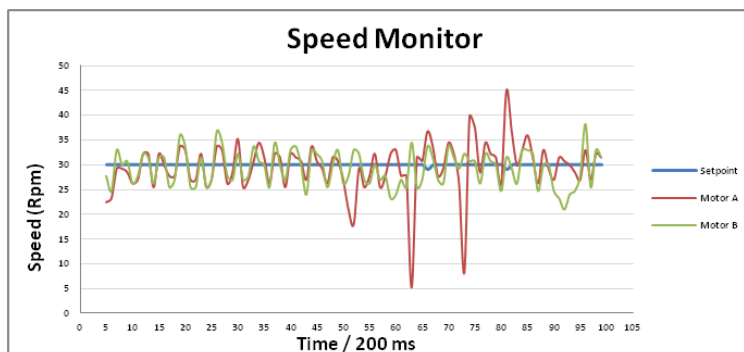
Gambar 11. Grafik Kecepatan Set Point 10 Rpm (Tanpa Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 10, nilai maksimal *error* motor A sebesar 9,25 dan *error* motor B sebesar 2,5, minimum *error* motor A sebesar -5,75 dan *error* motor B sebesar 2,75.



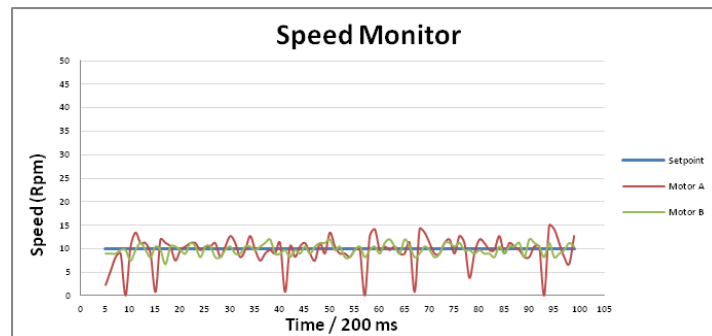
Gambar 12. Grafik Kecepatan Set Point 20 Rpm (Tanpa Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 11, nilai maksimal *error* motor A sebesar 17,75 dan *error* motor B sebesar 4,25, minimum *error* motor A sebesar -8,5 dan *error* motor B sebesar -4,75.



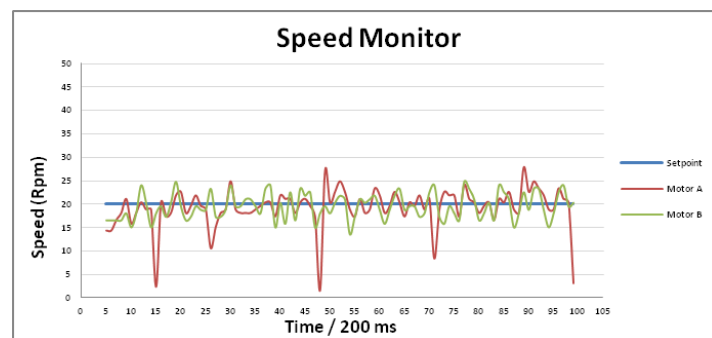
Gambar 13. Grafik Kecepatan Set Point 30 Rpm (Tanpa Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 12, nilai maksimal *error* motor A sebesar 24,75 dan *error* motor B sebesar 9, minimum *error* motor A sebesar -16 dan *error* motor B sebesar -8,25.



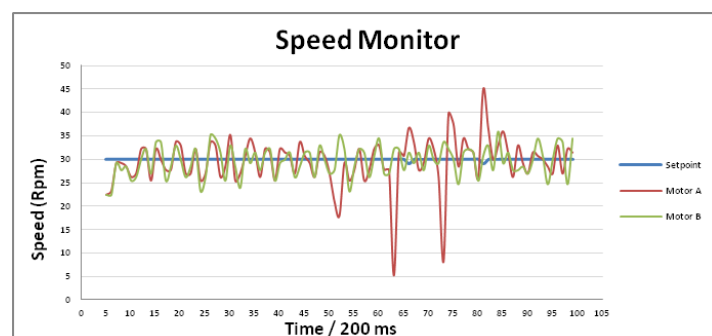
Gambar 14. Grafik Kecepatan Set Point 10 Rpm (Dengan Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 13, nilai maksimal *error* motor A sebesar 10 dan *error* motor B sebesar 15, minimum *error* motor A sebesar -5 dan *error* motor B sebesar 0.



Gambar 15. Grafik Kecepatan Set Point 20 Rpm (Dengan Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

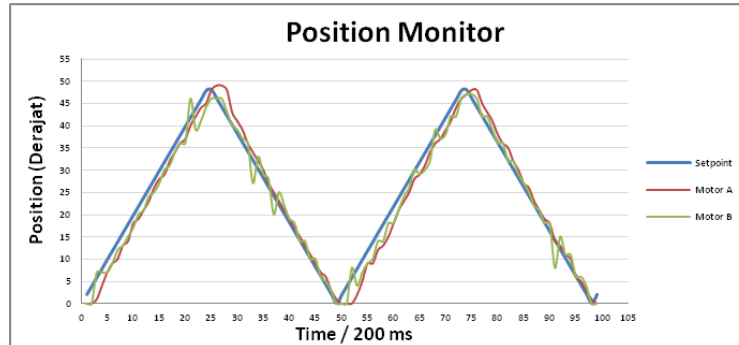
Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 14, nilai maksimal *error* motor A sebesar 18,5 dan *error* motor B sebesar 6,5, minimum *error* motor A sebesar -7,75 dan *error* motor B sebesar -4,75.



Gambar 16. Grafik Kecepatan Set Point 30 Rpm (Dengan Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

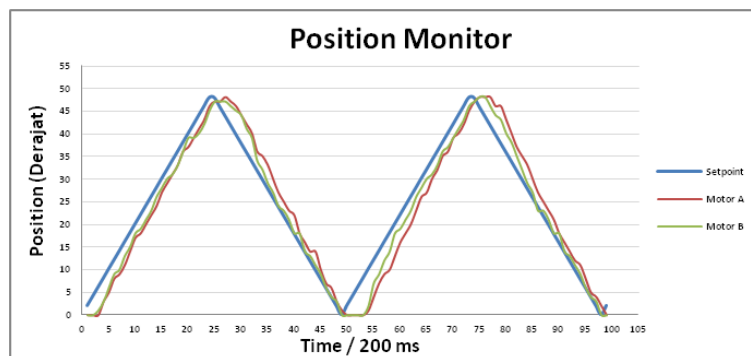
Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 15, nilai maksimal *error* motor A sebesar 24,75 dan *error* motor B sebesar 7,5, minimum *error* motor A sebesar -16 dan *error* motor B sebesar -6.

Pengujian perubahan nilai sudut dilakukan dengan tanpa beban dan menggunakan beban dengan beberapa variasi *set point* yang diberikan. Pengujian ini dilakukan terhadap dua motor DC yang berbeda yang digambarkan dalam satu grafik garis, di mana garis biru adalah *set point*, garis merah adalah *error* motor A, dan garis oranye adalah *error* Motor B.



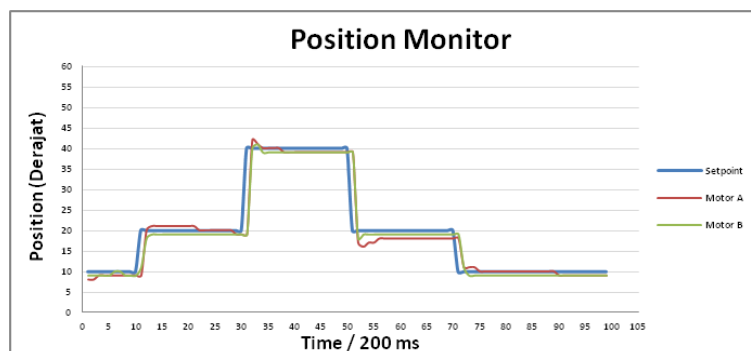
Gambar 17. Grafik Perubahan Sudut Perlahan (Tanpa Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 16, nilai maksimal *error* motor A sebesar 6 dan *error* motor B sebesar 6, minimum *error* motor A sebesar 6 dan *error* motor B sebesar -4.



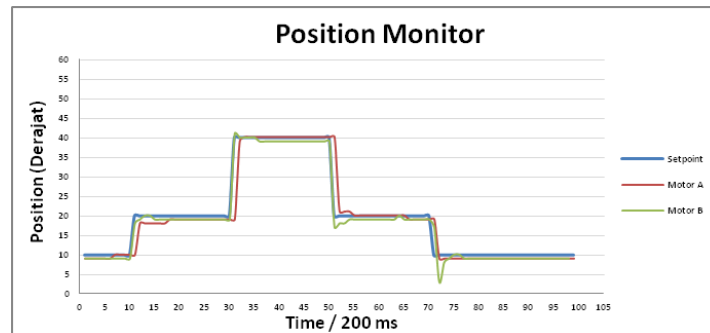
Gambar 18. Grafik Perubahan Sudut Perlahan (Dengan Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 17, nilai maksimal *error* motor A sebesar 9 dan *error* motor B sebesar 8, minimum *error* motor A sebesar -8 dan *error* motor B sebesar -6.



Gambar 19. Grafik Perubahan Sudut Secara Cepat (Tanpa Beban)  
Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 18, nilai maksimal *error* motor A sebesar 21 dan *error* motor B sebesar 21, minimum *error* motor A sebesar 19 dan *error* motor B sebesar -19.



Gambar 20. Grafik Perubahan Sudut Secara Cepat (Dengan Beban)  
 Sumber : Penulis (2025)

Berdasarkan grafik yang digambarkan pada Gambar 19, nilai maksimal *error* motor A sebesar 21 dan *error* motor B sebesar 7, minimum *error* motor A sebesar -20 dan *error* motor B sebesar -8.

Dari hasil pengujian dengan beberapa variasi kecepatan dan beberapa variasi perubahan sudut yang telah dilakukan perlu adanya rangkuman guna mengetahui hasil rata-rata dari keseluruhan pengujian, rangkuman tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Rangkuman Pengujian Kecepatan

| Rpm                          | Rata-rata Error<br>(Tanpa Beban) |         | Rata-rata Error<br>(Dengan Beban) |         |
|------------------------------|----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
|                              | Motor A                          | Motor B | Motor A                           | Motor B |
| 10                           | -0,24                            | 0,04    | 0,42                              | 9,57    |
| 20                           | 0.05                             | 0,07    | 0,82                              | 0,53    |
| 30                           | -0,45                            | 0,72    | -0,45                             | 0,31    |
| <b>Rata-Rata Keseluruhan</b> | -0,3033                          | 0,2766  | 0,2633                            | 3,47    |

Tabel 3. Rangkuman Pengujian Perubahan Sudut

| Perubahan Set Point<br>Derajat | Rata-rata Error<br>(Tanpa Beban) |         | Rata-rata Error<br>(Dengan Beban) |         |
|--------------------------------|----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
|                                | Motor A                          | Motor B | Motor A                           | Motor B |
| Secara Perlahan                | 0,68                             | 0,87    | 0,32                              | 0,65    |
| Secara Cepat                   | 0,70                             | 0,92    | 0,63                              | 0,02    |
| <b>Rata-Rata Keseluruhan</b>   | 0,69                             | 0,895   | 0,475                             | 0,335   |

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sebuah modul kontrol cerdas terintegrasi untuk motor DC berbasis algoritma PID, mikrokontroler STM32F103C8T6, dan rotary encoder sebagai umpan balik. Sistem ini dirancang sebagai sistem loop tertutup untuk mengatasi keterbatasan sistem open loop yang rentan terhadap gangguan beban, dengan tujuan menjaga kestabilan kecepatan putar dan akurasi posisi sudut secara bersamaan.

### Sintesis Temuan Utama

1. Kontrol Kecepatan: Sistem mampu menjaga kestabilan kecepatan motor DC dengan rata-rata error yang sangat kecil. Dalam kondisi tanpa beban, rata-rata error adalah -0,3033 RPM (Motor A) dan 0,2766 RPM (Motor B). Ketika diberi beban (flywheel 0,5 kg), sistem tetap stabil dengan rata-rata error 0,2633 RPM (Motor A) dan 3,47 RPM (Motor B). Hasil ini menunjukkan bahwa kontroler PID efektif dalam mengkompensasi gangguan beban, meskipun respons Motor B menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan mekanis.
2. Kontrol Posisi Sudut: Sistem juga mampu mengendalikan perubahan posisi sudut dengan akurasi tinggi. Rata-rata error tanpa beban adalah 0,69° (Motor A) dan 0,895° (Motor B). Menariknya, ketika beban diberikan, error pada Motor B justru menurun menjadi 0,335°, yang mengindikasikan efek redaman inersia yang membantu mengurangi osilasi. Ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya stabil, tetapi juga adaptif terhadap dinamika beban.
3. Integrasi Modul: Keunggulan utama penelitian ini terletak pada integrasi fisik dan fungsional komponen utama (STM32, driver motor, antarmuka encoder) dalam satu modul PCB. Desain ini mengurangi kompleksitas perakitan, meminimalkan kesalahan kabel, dan menciptakan sistem yang lebih kompak dan siap pakai (plug-and-play), sesuai dengan tren miniaturisasi dalam sistem embedded.

### Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam bidang kontrol motor DC:

1. Inovasi Desain: Menyajikan modul kontrol cerdas yang menggabungkan kontrol kecepatan dan posisi dalam satu sistem terintegrasi, mengisi gap dari penelitian sebelumnya yang cenderung fokus pada satu mode kontrol.
2. Praktikalitas: Modul ini dirancang untuk mudah diimplementasikan dalam aplikasi dunia nyata, seperti otomasi industri, robotika (misalnya kontes robot ABU Robocon), dan sistem pendidikan.
3. Validasi Eksperimen: Kinerja sistem telah divalidasi secara eksperimen di bawah berbagai kondisi (tanpa beban, dengan beban, kecepatan berbeda, perubahan sudut cepat/perlahan), membuktikan keandalannya.

### Keterbatasan

Meskipun hasilnya sangat menjanjikan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan:

1. Tuning Parameter PID: Proses tuning parameter ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) dilakukan secara manual (trial-and-error), yang bersifat subjektif dan mungkin tidak menghasilkan nilai optimal mutlak. Pendekatan ini kurang efisien dibandingkan metode optimasi otomatis.
2. Lingkungan Pengujian: Pengujian dilakukan dalam lingkungan laboratorium terkendali. Efek faktor eksternal seperti suhu, kelembapan, dan noise elektromagnetik belum dievaluasi.
3. Skala Pengujian: Pengujian hanya dilakukan pada dua unit motor DC dengan spesifikasi terbatas. Validasi lebih lanjut diperlukan pada motor dengan kapasitas dan jenis yang berbeda.

### Arah Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan temuan dan keterbatasan, disarankan beberapa arah penelitian lanjutan:

1. Implementasi Tuning Otomatis: Mengembangkan algoritma tuning parameter PID secara otomatis menggunakan metode optimasi seperti Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), atau Evolutionary Optimization (EO) untuk mencapai performa optimal tanpa intervensi manual.

2. Versi Nirkabel: Mengembangkan modul dengan konektivitas nirkabel (Bluetooth/Wi-Fi) untuk memungkinkan remote monitoring dan setting parameter secara real-time, meningkatkan fleksibilitas penggunaan.
3. Pengujian di Lingkungan Nyata: Melakukan pengujian di lingkungan industri atau aplikasi robotika nyata untuk mengevaluasi kinerja sistem di bawah kondisi operasional yang dinamis.
4. Integrasi dengan Sistem Lebih Besar: Mengintegrasikan modul ini ke dalam sistem kontrol yang lebih kompleks, seperti robot mobile atau sistem conveyor otomatis, untuk mengevaluasi interoperabilitas dan skalabilitas.

## REFERENCES

- Al-Mahasneh, A. J., & Maghari, A. Y. M. (2020). Optimization of PID Parameters Using Genetic Algorithm for DC Motor Speed Control. *Applied Soft Computing*, 87, 105924. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105924>
- Bitriá, R., & Palacín, J. (2022). Optimal PID Control of a Brushed DC Motor with an Embedded Low-Cost Magnetic Quadrature Encoder for Improved Step Overshoot and Undershoot Responses in a Mobile Robot Application. *Sensors*, 22(20), 7817. <https://doi.org/10.3390/s22207817>
- Chen, L., Liu, Y., & Wang, X. (2023). Real-Time Position Control of DC Motors Using Quadrature Encoders and STM32 Timers. *Microprocessors and Microsystems*, 98, 104567. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104567>
- Firdaus, F., Priatna, E., Hiron, N., & Busaeri, N. (2022). *PROTOTYPE SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC DENGAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) CONTROLLER*. 4(1).
- Gupta, S., & Singh, R. (2023). Design and implementation of a compact PID controller for DC motor speed regulation using STM32. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 34, 112–121. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00945-6>
- Gurauskis, D., Marinkovic, D., Mažeika, D., & Kilikevičius, A. (2024). Self-Calibratable Absolute Modular Rotary Encoder: Development and Experimental Research. *Micromachines*, 15(9), 1130. <https://doi.org/10.3390/mi15091130>
- Islam, M. R., Ahmed, S., & Rahman, M. T. (2022). An integrated control module for DC motors in robotic applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 103945. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.103945>
- Kurniawan, A., Setiawan, D., & Pratama, R. (2023). Development of a low-cost smart motor controller for industrial automation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2501(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2501/1/012034>
- Lee, J., & Park, S. (2021). Embedded Motor Control Systems: Trends and Challenges. *Electronics*, 10(14), 1678. <https://doi.org/10.3390/electronics10141678>
- Li, Z., & Liu, Y. (2021). Embedded Systems for Motor Control: A Review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(7), 5890–5902. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3003821>
- Ma'arif, A. (2021). Embedded Control System of DC Motor Using Microcontroller Arduino and PID Algorithm. *IT Journal Research and Development*, 6(1), 30–42. [https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6\(1\).6125](https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6(1).6125)
- Manuel, N. L., İnanç, N., & Lüy, M. (2023). Control and performance analyses of a DC motor using optimized PIDs and fuzzy logic controller. *Results in Control and Optimization*, 13, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100306>
- Murtono, A., & Kamajaya, L. (2021). *Implementasi Kontrol PID untuk Analisis Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan STM32*.

- Nguyen, T. H., & Le, V. D. (2022). Embedded system design for precise position control of DC motors using quadrature encoder feedback. *Sensors and Actuators A: Physical*, 345, 113789. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113789>
- Patel, K., & Desai, H. (2023). PID-based speed control of DC motor using STM32F103C8T6: A comparative study. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(1), 456–465. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i1.pp456-465>
- Pop, A. A. (2022). Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS. *Sensors*, 22(14), 5127. <https://doi.org/10.3390/s22145127>
- Pradana, R., Suryadi, D., & Nugraha, A. (2023). Development of miniaturized motor driver module for educational robotics. *Jurnal Teknologi*, 85(4), 111–120. <https://doi.org/10.14710/jteknol.85.4.111-120>
- Prayogo, R. C., Triwiyatno, A., & Riyadi, M. A. (2023). Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6. *Journal of Physics: Conference Series*, 2622(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2622/1/012025>
- Rahman, M. A., & Hossain, M. K. (2022). Comparative Study of PID Tuning Methods for DC Motor Control. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(3), 2456–2465. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2456-2465>
- Rashid, Y. G., & Hussain, A. M. A. (2021). Implementing optimization of PID controller for DC motor speed control. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 23(2), 657. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp657-664>
- Sozański, K. (2023). Low Cost PID Controller for Student Digital Control Laboratory Based on Arduino or STM32 Modules. *Electronics*, 12(15), 3235. <https://doi.org/10.3390/electronics12153235>
- Suman, S., & Gupta, D. (n.d.). *Closed Loop Speed Control of Brushless DC Motor Using STM32 Microcontroller*.
- Thai, N. L., & Kieu, N. T. (2022). Real-Time PID Controller for a DC Motor Using STM32F407. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 7(8), 472–478. <https://doi.org/10.36348/sjet.2022.v07i08.007>
- Wang, X., Li, Z., & Liu, Y. (2023). Design of Integrated Control Module for Brushed DC Motors in Mobile Robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 160, 104321. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104321>
- Yıldırım, Ş., Bingol, M. S., & Savas, S. (2024). Tuning PID controller parameters of the DC motor with PSO algorithm. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 15(3), 281–286. <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00698>
- Yulianto, B., Karjadi, M., & Dwinanto, B. (2024). Sistem Pengereman Dinamik Dan Pengendali Kecepatan Pada Motor DC. *Syntax Idea*, 6(8), 3669–3680. <https://doi.org/10.46799/syntax-idea.v6i8.4313>
- Zhang, Y., & Wang, H. (2023). Compact Motor Control Module for Robotics Using STM32 and Integrated Feedback. *IEEE Access*, 11, 12345–12356. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3245678>