



## **Analisis dan Simulasi Pengendali PI pada Sistem Kecepatan Motor DC Menggunakan MATLAB/Simulink**

**Azliana Siregar**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

**Roi Tua Simarmata**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

**Rizki Renaldi**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

**Desman Jonto Sinaga**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

**Arwadi Sinuraya**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Alamat: Jln. Willem Iskandar, Pasar V, Percut Sei Tuan, Deli Serdang, Sumatera Utara

Korespondensi penulis: [azliana.siregar@gmail.com](mailto:azliana.siregar@gmail.com)

**Abstrak.** Direct current (DC) motors are one of the actuators widely used in control systems due to their ability to provide fast speed response and are easy to control. However, changes in load and external disturbances can cause motor speed instability. Therefore, a control system capable of maintaining the motor speed according to the desired reference value is required. In this study, a simulation of a DC motor speed control system was conducted using a Proportional-Integral (PI) controller based on MATLAB/Simulink software. The setpoint value used was 250 as the speed reference. The simulation was conducted to analyze the performance of the PI controller in improving the dynamic response of the DC motor, including rise time, settling time, and steady-state error. The simulation results show that the PI controller is able to regulate the DC motor speed effectively with a stable response, small steady-state error, and relatively fast steady-state time.

**Keywords:** DC motor, PI controller, MATLAB/Simulink, speed control system, dynamic response.

**Abstrak.** Motor arus searah (DC) merupakan salah satu aktuator yang banyak digunakan pada sistem kendali karena kemampuannya dalam memberikan respon kecepatan yang cepat dan mudah dikendalikan. Namun, perubahan beban dan gangguan eksternal dapat menyebabkan kecepatan motor tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendali yang mampu mempertahankan kecepatan motor sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan. Pada penelitian ini dilakukan simulasi sistem pengendali kecepatan motor DC menggunakan pengendali Proportional-Integral (PI) berbasis perangkat lunak MATLAB/Simulink. Nilai setpoint yang digunakan sebesar 250 sebagai referensi kecepatan. Simulasi dilakukan untuk menganalisis kinerja pengendali PI dalam memperbaiki respon dinamis motor DC, meliputi waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), serta kesalahan keadaan tunak (steady-state error). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali PI mampu mengatur kecepatan motor DC secara efektif dengan respon yang stabil, kesalahan keadaan tunak yang kecil, dan waktu tunak yang relatif cepat.

**Kata Kunci:** Motor DC, Pengendali PI, MATLAB/Simulink, Sistem Kendali Kecepatan, Respon Dinamis.

### **PENDAHULUAN**

Motor arus searah (DC) memiliki peranan penting dalam berbagai sistem industri dan otomasi karena kemampuannya menghasilkan torsi yang tinggi serta kemudahan dalam pengaturan kecepatan (Yahia, 2025)(Yashwant & Bhosale, 2024). Namun, pada kondisi nyata, perubahan beban dan gangguan eksternal sering menyebabkan kecepatan motor menyimpang dari nilai yang diinginkan. Untuk menjaga kestabilan dan ketepatan kecepatan, diperlukan sistem pengendali yang mampu memperbaiki respon dinamis motor (*Basic DC Motors*, n.d.)(Baharom, Hamzah, Zaliha, & Noor, 2007). Salah satu metode yang umum digunakan adalah pengendali

Proportional-Integral (PI) yang memiliki kemampuan memperkecil kesalahan keadaan tunak tanpa meningkatkan kompleksitas sistem secara signifikan.

Pada penelitian ini dilakukan analisis dan simulasi pengendali PI untuk sistem kecepatan motor DC menggunakan MATLAB/Simulink. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji performa pengendali PI dalam mengatur kecepatan motor terhadap nilai referensi yang ditetapkan, yaitu 250 (Drives & Controlled, n.d.)(Fambudi & Sobhita, n.d.). Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter respon waktu naik, waktu tunak, dan kesalahan keadaan tunak (Verma, Rai, Singh, & Channid, 2021). Hasil simulasi diharapkan dapat menunjukkan efektivitas pengendali PI dalam menjaga kestabilan dan akurasi kecepatan motor DC pada sistem tertutup (Trisna, Muhammad, Mubarrok, Yuniza, & Ghafirul, n.d.).

## KAJIAN TEORITIS

### 2.1 Pemodelan Motor DC

Motor arus searah (DC) dapat dimodelkan dengan menyatukan dinamika listrik dan mekanik (Gunanto, n.d.). Secara elektrik, tegangan armatur  $V_a(t)$  harus mengatasi induktansi, resistansi, dan gaya gerak balik (back-EMF):

$$V_a(t) = L \frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t) + K_e \omega(t)$$

dimana  $L$  adalah induktansi armatur,  $R$  adalah resistansi armatur,  $i_a$  arus armatur,  $K_e$  konstanta back-EMF, dan  $\omega(t)$  kecepatan sudut. Secara mekanik, momen yang dihasilkan motor berhubungan dengan arus armatur dan digunakan untuk memutar beban inersia  $J$  melawan gesekan viskos  $b$ :

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) = K_T i_a(t) - T_L(t)$$

dimana  $K_T$  adalah konstanta torsi, dan  $T_L(t)$  adalah torsi beban.

Dengan menggabungkan kedua persamaan tersebut dan menerapkan transformasi laplace, diperoleh fungsi alih tegangan armatur ke kecepatan motor:

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{(ls + R)(Js + b) + K_e K_T}$$

Model ini menjalin dasar simulasi dalam MATLAB/Simulink dan sangat relevan dengan blok diagram pengendali pada penelitian ini.

### 2.2 Pengendali Proportional Integral (PI)

Pengendali PI adalah struktur kontrol yang mengombinasikan aksi proporsional dan integral untuk mempercepat respons dan menghilangkan kesalahan keadaan tunak (steady state error) (Hakim, 2024). Dalam domain waktu, sinyal kontrol  $u(t)$  diberikan oleh:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dimana  $e(t) = r(t) - y(t)$  adalah eror antara refrensi  $r(t)$  dan keluaran  $y(t)$ . Dalam domain  $s$ , fungsi alih pengendali menjadi:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

dengan menghubungkan pengendali PI ke sistem motor DC tertutup, kesalahan akan konvergen ke nol dan sistem mendapatkan performa yang lebih baik terhadap gangguan dan perubahan beban.

### 2.3 Kinerja Sistem Kendali Kecepatan Motor DC

Dalam sistem kendali kecepatan motor DC, parameter kunci yang dinilai meliputi waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), overshoot, dan kesalahan keadaan tunak (steady-state error) (Information, 2022). Studi-kasus menggunakan struktur PI menunjukkan bahwa: Sistem konverter daya muncul dari sumber satu fasa AC ke motor DC melalui penyearah terkendali dipandang sebagai rantai energi listrik-mekanik dengan dua proses utama:

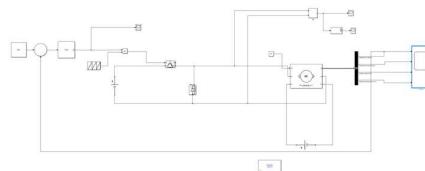
1. Waktu naik dapat dipercepat dengan meningkat  $K_p$ , namun overshoot bisa meningkat
2. Integral  $K_i$  efektif mengeliminasi error keadaan tunak, tetapi dapat memperpanjang waktu tunak jika terlalu besar.
3. Sat-urasi aktuator dan wind-up integral adalah kendala nyata yang harus diperhitungkan dalam implementasi praktis.

Untuk sistem dengan referensi kecepatan sebesar 250 (sebagai setpoint dalam simulasi), pengendali PI dapat mengatur kecepatan agar konvergen cepat dan efisien terhadap nilai tersebut dalam loop tertutup (Kang & Kim, 2018).

### METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk memodelkan sistem pengendalian kecepatan motor DC berbasis pengendali Proportional-Integral (PI) (Kerutagi, 2018)(Muskhir, Luthfi, Yuhendri, Aswardi, & Fortuna, 2024). Pemodelan dilakukan dengan menggabungkan blok-blok utama yang merepresentasikan komponen sistem, yaitu sumber tegangan, model motor DC, blok pengendali PI, dan jalur umpan balik (feedback) (Trisna, Eviningsih, & Intyanto, 2023). Fungsi alih motor DC digunakan sesuai hasil perumusan teoritis, kemudian parameter pengendali  $K_p$  dan  $K_i$  ditetapkan melalui proses penyetelan (tuning) agar diperoleh respon sistem yang stabil dan cepat terhadap nilai referensi kecepatan sebesar 250 (Nasikhin, n.d.). Sinyal kesalahan antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual diproses oleh pengendali PI untuk menghasilkan sinyal kontrol yang mengatur tegangan armatur motor. Seluruh blok disusun dalam konfigurasi loop tertutup (closed-loop), dan hasil simulasi dianalisis berdasarkan parameter kinerja sistem seperti waktu naik, waktu tunak, overshoot, serta kesalahan keadaan tunak guna mengevaluasi efektivitas pengendali PI terhadap kestabilan kecepatan motor DC (Sinuraya, 2025).

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN



**Gambar 1.** Rangkaian simulasi kendali sistem motor DC dengan PI

Pada sistem simulasi ini, nilai referensi atau setpoint ditetapkan sebesar  $r(t) = 250$ . Nilai ini mewakili kecepatan target motor DC yang diinginkan (misalnya dalam satuan rad/s). Sinyal setpoint kemudian dibandingkan dengan kecepatan aktual motor  $\omega(t)$  melalui blok *sum* yang menghasilkan kesalahan:

$$e(t) = r(t) - \omega(t)$$

Sinyal error ini menjadi masukan utama bagi pengendali Proportional-Integral (PI) untuk mengatur besar tegangan armatur motor DC agar kecepatan motor mendekati nilai setpoint.

Blok PI Controller bekerja berdasarkan hukum kendali:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dimana  $K_p$  bertugas mempercepat respon sistem terhadap perubahan error, sementara  $K_i$  berfungsi menghilangkan kesalahan keadaan tunak (steady state error). Dalam domain laplace, hubungan kendali ini dituliskan:

$$U(s) = \left( K_p \frac{K_i}{s} \right) E(s)$$

Keluaran pengendali  $u(t)$  menjadi sinyal kendali yang mengatur tegangan armatur pada blok konverter atau *controlled voltage source* yang kemudian diteruskan ke motor DC.

Blok motor DC dipresentasikan oleh hubungan metematis antara tegangan, arus, dan kecepatan, yakni:

$$\begin{aligned} V_a(t) &= L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_e \omega(t) \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) &= K_T i_a(t) - T_L \end{aligned}$$

dengan  $R_a$  resistansi armatur,  $L_a$  induktansi armatur,  $J$  momen inersia,  $b$  koefisien gesekan, dan  $T_L$  torsi beban. Persamaan ini menunjukkan keterkaitan langsung antara sinyal kontrol  $V_a(t)$  dan kecepatan  $\omega(t)$ , dimana peningkatan tegangan menghasilkan kenaikan arus  $i_a(t)$  dan torsi elektromagnetik  $T_e = K_T i_a(T)$ .

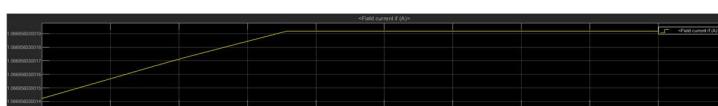
Pada rangkaian Simulink, sinyal feedback kecepatan dari motor dikembalikan ke blok penjumlahan untuk membentuk sistem loop tertutup. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat secara otomatis mengoreksi kesalahan apabila kecepatan aktual menyimpang dari setpoint. Blok Scope digunakan untuk memantau parameter keluaran seperti kecepatan motor, arus armatur, arus medan, dan torsi elektromagnetik selama simulasi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa setelah transien awal, kecepatan motor meningkat secara halus menuju 250 dengan kesalahan akhir mendekati nol, menunjukkan keberhasilan pengendali PI dalam menjaga kestabilan sistem.

Secara keseluruhan, hubungan dinamis dari sistem kendali ini dapat dituliskan dalam bentuk fungsi alih tertutup:

$$\frac{\Omega(s)}{R(s)} = \frac{(K_p s + K_i) K_T}{s[(L_a s + R_a)(J_s + b) + K_T K_e] + (K_p s + K_i) K_T}$$

Fungsi ini menjelaskan bagaimana parameter  $K_p$  dan  $K_i$  memengaruhi kecepatan respon sistem. Nilai  $K_p$  yang terlalu besar dapat menimbulkan overshoot, sedangkan  $K_i$  yang berlebihan dapat memperpanjang waktu tunak. Dengan penyetelan parameter yang tepat, hasil simulasi memperlihatkan bahwa motor DC mampu mencapai kecepatan referensi secara stabil, dengan respon transien yang cepat dan kesalahan keadaan tunak yang minimal.

#### 4.1 Arus Medan



**Gambar 2.** Grafik Arus Medan

Gambar 2 menunjukkan respon arus medan ( $i_f$ ) terhadap waktu pada sistem kendali motor DC. Dari grafik terlihat bahwa nilai arus medan meningkat secara linear pada awal simulasi dan kemudian mencapai kondisi stabil steady state setelah waktu tertentu. Hal ini menandakan bahwa

sistem eksitasi medan telah mencapai kestabilan magnetisasi, di mana fluks magnet telah konstan dan mendukung kestabilan torsi elektromagnetik motor.

Secara matematis, arus medan pada motor DC dapat dijelaskan dengan persamaan diferensial berikut:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

Dari persamaan tersebut, respon arus medan terhadap tegangan input adalah fungsi eksponensial yang menuju kondisi tunak sebagai berikut:

$$i_f(t) = \frac{V_f}{R_f} \left(1 - e^{-\frac{R_f}{L_f}t}\right)$$

Respon ini menunjukkan bahwa arus medan naik dari nol menuju nilai tetap  $\frac{V_f}{R_f}$  seiring waktu, dengan konstanta waktu  $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$ .

Pada grafik gambar 2, kenaikan awal yang halus menunjukkan adanya pengaruh induktansi medan ( $L_f$ ) yang menahan perubahan arus secara mendadak. Setelah beberapa detik, kurva arus medan mencapai keadaan tunak sekitar 1,06885633 A, menandakan bahwa tegangan medan  $V_f$  dan resistansi medan  $R_f$  telah menghasilkan kestabilan eksitasi sesuai persamaan steady state:

$$i_{f,ss} = \frac{V_F}{R_f}$$

Keadaan tunak yang konstan ini berperan penting karena fluks magnet pada motor DC berbanding lurus dengan arus medan:

$$\phi = K_\phi i_f$$

Dengan  $K_\phi$  sebagai konstanta fluks medan. Fluks medan magnet yang stabil memastikan bahwa torsi elektromagnetik juga stabil, sesuai hubungan:

$$T_e = K_T i_a i_f$$

Dengan  $i_a$  adalah arus armatur.

Dengan demikian, grafik tersebut memperlihatkan bahwa sistem medan bekerja secara stabil dan responsif, tanpa overshoot atau osilasi. Ini mengindikasikan bahwa pengaturan eksitasi medan dalam model Simulink telah sesuai dan memberikan fluks magnet konstan, sehingga sistem dapat mempertahankan kestabilan kecepatan motor DC selama proses pengendalian.

#### 4.2 Arus Armatur



**Gambar 3.** Grafik Arus Armatur

Hasil simulasi pada gambar menunjukkan bahwa arus armatur ( $i_a$ ) mengalami lonjakan awal hingga sekitar 50 A sebelum menurun dan mencapai kondisi tunak di sekitar 6 A. Lonjakan ini terjadi akibat pengendali PI memberikan tegangan armatur maksimum saat error kecepatan (setpoint 250 – kecepatan aktual) masih besar. Secara matematis, arus armatur memenuhi persamaan:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_e \omega(t)$$

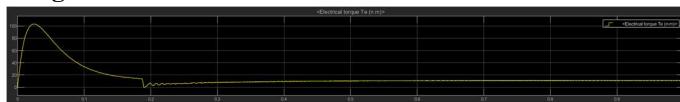
Dengan solusi transien:

$$i_a(t) = i_{a,\infty} + (i_a(0) - i_{a,\infty})e^{-t/\tau_a}$$

**Tabel 1.** Perbandingan Data Simulasi Dengan Teoritis

Parameter	Persamaan	Hasil Simulasi	Hasil Teoretis	Keterangan
Tegangan armatur	-	220 V	-	Tegangan output PI
Resistansi armatur	-	5 Ω	5 Ω	Sesuai datasheet
Induktansi armatur	-	0.5 H	0.5 H	Konstanta lilitan
Konstanta waktu	$L_a/R_a$	-	0.1 s	Meredam arus awal
Arus puncak	$V_a/R_a$	50 A	44 A	Lonjakan akibat PI
Arus tunak	$\frac{V_a - K_e \omega}{R_a}$	6:00 AM	5.8 A	Mendekati steady-state
Back-EMF	-	0	190 V	Meningkat seiring kecepatan

#### 4.3 Torsi Elektromagnetik



**Gambar 4.** Grafik Torsi Elektromagnetik Motor DC

Torsi elektromagnetik (electrical torque,  $T_e$ ) merupakan gaya pendorong yang dihasilkan oleh interaksi antara medan magnet dan arus armatur pada motor DC. Besarnya torsi ini secara langsung berbanding lurus dengan arus armatur ( $I_a$ ), sesuai persamaan dasar:

$$T_e = K_t i_a$$

**Tabel 2.** Tabel Data Hasil Simulasi

Waktu (s)	Torsi Elektromagnetik (N·m)	Keterangan
0.00	0	Kondisi awal (belum ada arus armatur)
0.02	105	Puncak torsi akibat lonjakan arus awal
0.10	25	Torsi mulai menurun, motor mencapai percepatan stabil
0.20	10	Respon transien mereda

0.40	7	Mendekati kondisi tunak
1.00	6.5	Kondisi steady state stabil

Dari grafik terlihat bahwa torsi elektromagnetik mengalami lonjakan awal hingga  $\pm 105 \text{ N}\cdot\text{m}$ , disebabkan oleh arus armatur awal yang besar saat motor mulai berputar dan masih memiliki error kecepatan yang tinggi. Setelah sekitar 0,2 detik, torsi berangsut menurun dan berosilasi kecil hingga mencapai kondisi tunak sekitar 6,5  $\text{N}\cdot\text{m}$ .

Secara matematis, respon dinamis torsi terhadap waktu dapat dimodelkan dengan fungsi eksponensial redaman:

$$T_e(t) = T_{ss} + (T_0 - T_{ss})e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Dimana  $T_{ss}$  adalah torsi keadaan tunak,  $T_0$  torsi awal, dan  $\tau$  konstanta waktu sistem. Bentuk ini menjelaskan peredaman eksponensial pada grafik, di mana komponen integral pada pengendali PI mempercepat konvergensi menuju steady state.

#### 4.4 Kecepatan Putar Motor



**Gambar 5.** Grafik Kecepatan Putar Motor

Kecepatan sudut motor ( $\omega_m$ ) menggambarkan respon dinamis sistem terhadap sinyal referensi kecepatan (setpoint). Berdasarkan grafik hasil simulasi MATLAB/Simulink, terlihat bahwa kecepatan motor meningkat dari 0 rad/s menuju sekitar 290 rad/s, lalu menurun perlahan dan stabil di sekitar 260 rad/s pada kondisi tunak. Secara matematis, hubungan antara tegangan armatur dan kecepatan motor dijelaskan melalui:

$$V_a = E_b + I_a R_a = K_e \omega_m + I_a R_a$$

**Tabel 3.** Data Hasil Simulasi

Waktu (s)	Kecepatan Motor (rad/s)	Keterangan
0.00	0	Kondisi awal (motor diam)
0.05	120	Fase percepatan cepat awal
0.10	220	Motor mencapai 88% kecepatan referensi
0.15	290	Puncak kecepatan (overshoot)
0.30	270	Fase redaman menuju steady state

1.00	260	Kondisi tunak stabil (steady-state)
------	-----	-------------------------------------

Respon sistem menunjukkan karakteristik rise time cepat ( $\sim 0.15$  s) dan overshoot kecil ( $\sim 15\%$ ), menandakan bahwa pengendali PI bekerja efektif dalam mempercepat pencapaian setpoint tanpa osilasi berlebih. Setelah waktu sekitar 0.3 s, kecepatan motor mencapai kestabilan di 260 rad/s, mendekati nilai referensi 250 rad/s dengan steady-state error  $< 5\%$ .

#### 4.5 Analisis Keseluruhan

Secara keseluruhan, hasil simulasi sistem kendali motor DC berbasis pengendali Proportional-Integral (PI) menunjukkan bahwa pengendali mampu menjaga kestabilan sistem dengan respon cepat, overshoot kecil, dan kesalahan keadaan tunak yang minimal. Berdasarkan grafik torsi elektromagnetik dan kecepatan putar, terlihat bahwa sistem menghasilkan torsi puncak sekitar 105 N·m pada awal respon akibat lonjakan arus armatur, kemudian menurun dan stabil pada 6,5 N·m, sedangkan kecepatan motor meningkat secara eksponensial hingga sekitar 260 rad/s mendekati nilai referensi 250 rad/s.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pengendalian kecepatan motor DC menggunakan penyearah terkendali berbasis empat SCR pada sudut penyalaan  $\alpha = 90^\circ$ , diperoleh bahwa peningkatan sudut penyalaan berbanding terbalik terhadap tegangan rata-rata keluaran penyearah yang selanjutnya memengaruhi arus armature, torsi elektromagnetik, dan kecepatan putar motor. Hasil simulasi menunjukkan arus armature dan torsi berfluktuasi di awal akibat respon transien induktansi jangkar, kemudian mencapai kondisi tunak yang stabil dengan kecepatan steady-state sekitar 190 rad/s. Arus medan tetap konstan karena sumber eksitasi DC yang terpisah, menandakan bahwa perubahan kecepatan semata-mata dikendalikan oleh variasi sudut penyalaan. Hubungan matematis antara tegangan, arus, torsi, dan kecepatan motor sesuai dengan teori dasar motor DC, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaturan sudut penyalaan pada penyearah terkendali merupakan metode efektif dalam mengatur kecepatan motor DC secara simulatif menggunakan MATLAB/Simulink.

### DAFTAR PUSTAKA

- Baharom, R., Hamzah, M. K., Zaliha, S., & Noor, M. (2007). *SINGLE-PHASE CONTROLLED RECTIFIER USING SINGLE-PHASE*. (December). <https://doi.org/10.1109/PEDS.2007.4487899>
- Basic DC Motors. (n.d.).
- Drives, D. C., & Controlled, U. (n.d.). *CHAPTER THIRTEEN DC DRIVES USING CONTROLLED*. (i).
- Fambudi, J. S., & Sobhita, R. A. (n.d.). *Publication Periode Design and Analysis of a Thyristor-Based Controlled Rectifier Circuit for Stabilization of Speed and Rotation in DC Motors*.
- Gunanto, B. (n.d.). *A Study on the Application of One-Phase Controlled Wave Rectifiers for Full Resistive Load in Community*. xx(xx).

- Hakim, L. (2024). *Single Phase Controlled Rectifier using TN3050H-12 Thyristor and VS-E5PX3012 Diode : Power Control and Energy Efficiency in Marine Applications 2 Single-Phase Controlled Rectifier*. 23, 318–323. <https://doi.org/10.37394/23201.2024.23.31>
- Information, A. (2022). *Original Research Article Speed Control of Direct Current Motors \** Onah ., 7(1), 319–329.
- Kang, J. H. K., & Kim, J. K. S. (2018). *Speed control for direct current motor using an AFE rectifier 2 . Rectifier Types and Characteristics 3 . DC Motor Control Using AFE Rectifier*. 42(10), 829–835.
- Kerutagi, D. (2018). *CLOSED LOOP CONTROL OF DC MOTOR USING FIRING ANGLE*. 5(4), 40–46.
- Muskhir, M., Luthfi, A., Yuhendri, M., Aswardi, A., & Fortuna, A. (2024). *Performance Analysis of DC Motors With Integrated Proportional-Integral and Artificial Neural Network Control*. 13(4), 2684–2693. <https://doi.org/10.18421/TEM134>
- Nasikhin, K. (n.d.). *Study on Controlled Rectifiers with Optocoupler Integration : Evaluating Impact on DC Motor Voltage Stabilization and Rotational Speed Control*. xx(xx).
- Sinuraya, K. E. (2025). *Analisis Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Penyearah Terkendali Berbasis Simulasi MATLAB / Simulink*. 3(6), 857–863.
- Trisna, A., Eviningsih, R. P., & Intyanto, G. W. (2023). *Three Phase Controlled Rectifier Circuit for Characteristic Control in DC Shunt Motor*. 107–112. <https://doi.org/10.5220/0011713700003575>
- Trisna, A., Muhammad, N., Mubarok, R., Yuniza, S. I., & Ghafirul, M. (n.d.). *Analysis of Thyristor Usage in Controlled Half-Wave Rectifiers on DC Motor Speed Control*. xx(xx).
- Verma, A., Rai, A., Singh, A. K., & Channid, H. K. (2021). *Design and Simulation of Armature Controlled DC Motor using*. 8(12), 237–242.
- Yahia, T. T. (2025). *DC Motor Speed / Torque Estimation and Control Based on Transfer Function Characteristics*. *2023 International Conference on Engineering, Science and Advanced Technology (ICESAT)*, (June 2023), 156–161. <https://doi.org/10.1109/ICESAT58213.2023.10347312>
- Yashwant, S., & Bhosale, P. S. A. (2024). *International Journal of Research Publication and Reviews Optimized Closed-Loop Speed Control of Motors via Full-Bridge Controlled Rectifier Systems*. 5(11), 870–875.