

# Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis PID Ziegler-Nichols Pada Alat Pengaduk Cairan Viskos

Budi Triyono<sup>1</sup>, Rizal Fadilah<sup>2</sup>, Toto Tohir<sup>3\*</sup>, Supriyanto<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

E-mail : <sup>1</sup>budi0904@polban.ac.id

<sup>2,3,4</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

E-mail : <sup>2</sup>rizal.fadilah.toi19@polban.ac.id; <sup>3,\*</sup>toto.tohir@polban.ac.id; <sup>4</sup>supriyanto@polban.ac.id

## ABSTRAK

Penggunaan motor DC pada sektor industri semakin meningkat dikarenakan kehandalan dan kemudahan pengendalian motor DC. Salah satu penerapannya adalah pada mesin pencampur cairan, lebih khusus pada alat pengaduk cairan viskos yang memerlukan proses pengadukan berbagai macam bahan. Pengendalian motor DC bertujuan untuk mempertahankan kecepatan motor saat diberikan gangguan. Dalam penerapannya, digunakan PLC Mitsubishi FX3U sebagai pengendali utama sistem, sensor *proximity*, modul konverter frekuensi ke Tegangan, serta modul driver motor BTS7960. Respon dari sistem dengan diterapkan nilai parameter  $K_p$  sebesar 4,717,  $K_i$  sebesar 41,059, dan  $K_d$  sebesar 0,136 menghasilkan nilai *error* 8,75% pada sistem. Dibandingkan dengan respon tanpa PID sebesar 15,2% hasil tersebut sudah dapat meningkatkan kinerja sistem sebesar 64,5%.

## Kata Kunci

Kendali PID, PLC, Ziegler-Nichols, Pencampuran cairan, Kecepatan motor DC (maks. 6 kata)

## 1. PENDAHULUAN

Industri maupun penggunaan personal motor DC sudah sangat meluas untuk diterapkan pada beberapa aplikasi atau alat yang dapat membantu kegiatan manusia. Untuk dapat menggunakan motor DC dalam aplikasi alat tentunya diperlukan suatu sistem pengendali motor DC sehingga diperoleh manipulasi kecepatan motor DC yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Alat pengaduk cairan viskos merupakan alat yang digunakan untuk membuat material yang merupakan cairan kental. Alat tersebut harus dapat dikendalikan untuk temperatur tabung pemanas, dan kecepatan motor DC untuk proses pengadukan. Pengendalian motor DC dengan metode P, PI, PID dapat diterapkan dan sudah lazim digunakan untuk pengendalian motor DC serta tinggal memilih tipe kontrol tersebut sesuai dengan kebutuhan dari *plant* [1]. Pengendalian motor DC dengan metode PID dapat dilakukan secara langsung ataupun melalui suatu perangkat lunak penghubung seperti Visual Basic untuk dijadikan sebagai antarmuka dengan pengguna [2]. Selain menggunakan PID konvensional dengan metode ziegler-nichols terdapat beberapa

metode penalaan PID diantaranya dengan menggunakan metode *Root Locus*, *Genetic Algorithm* untuk PID, Heuristic dengan bantuan *Supply Chain Management*, dan Kendali Fuzzy-PID [3].

Percobaan penerapan dari teknik sistem kendali dengan menggunakan metode PID diterapkan pada mesin pengaduk material makanan dan kue. Penerapan PID pada mesin tersebut menghasilkan performa motor DC yang lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan metode PID yang dapat menyebabkan motor DC cepat panas [4]. Penerapan lain dari metode PID untuk pengaturan kecepatan motor DC adalah pada proses konversi minyak masak menjadi biodiesel yang memerlukan proses pemanasan dan pengadukan stabil. Hasil penerapan metode PID pada proses tersebut membuat proses beroperasi lebih baik [5].

Untuk beberapa penerapan metode PID yang masih belum optimal perlu diterapkan penalaan (*tuning*) pada parameter PID yang telah ditentukan sebelumnya. Selain menggunakan metode ziegler-nichols terdapat metode *tuning* lain seperti metode metaheuristic yang telah terbukti proses penalaan pada *plant* tertentu dapat menghasilkan respon

sistem yang lebih baik [6]. Dalam mendapatkan respon *plant* digunakan bantuan perangkat lunak seperti Microsoft Excel untuk akuisisi data yang terdapat pada perangkat. Adapun biasanya digunakan protokol komunikasi Modbus untuk dapat melakukan akuisisi data khususnya dari perangkat PLC. Proses akuisisi dapat dilakukan jika parameter Modbus telah terpenuhi dan sinkron terhadap perangkat lunak yang dipakai. Keluaran akuisisi data dari *plant* ini dapat digunakan sebagai data historikal maupun data analitikal salah satunya adalah untuk proses *tuning* parameter PID [7].

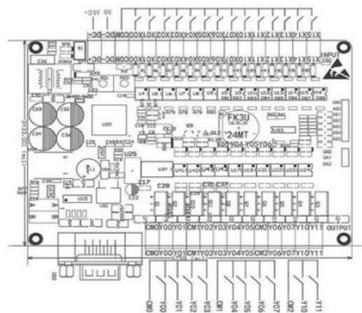
Metode pengendalian lanjutan dari metode PID yang dapat diterapkan antara lain *self-tuning* PID, PID dengan metode optimasi *Haris Hawk Optimization Algorithm*, serta *adaptive* PID dengan menggunakan logika Fuzzy [8]–[10].

Adapun untuk penelitian yang akan difokuskan adalah penerapan serta perhitungan PID dengan menggunakan metode ziegler-nichols untuk kecepatan motor pengaduk yang dikhususkan pada alat pengaduk cairan viskos. Dengan menggunakan PLC Mitsubishi FX3U sebagai pengendali utama dan beberapa komponen pendukung agar sistem dapat beroperasi.

## 2. DASAR TEORI

Pada dasar teori akan membahas mengenai teori pendukung yang diperlukan dalam penelitian ini seperti komponen-komponen penunjang yang dipakai, dan teori metode yang diterapkan pada penelitian ini.

### 2.1 Programmable Logic Controller (PLC)



Gambar 1. Diagram skematik PLC Mitsubishi FX3U

*Programmable Logic Controller* (PLC) merupakan suatu perangkat yang digunakan untuk mengendalikan suatu proses atau suatu kegiatan secara terstruktur sesuai dengan algoritma

program yang telah dibuat serta telah memenuhi kualifikasi untuk digunakan pada industri. Dalam pemrograman PLC biasanya digunakan bahasa pemrograman *ladder diagram*, namun selain *ladder diagram* terdapat bahasa pemrograman lainnya seperti *structured list* (ST), *instruction list* (IL) dan *function block diagram* (FB). Untuk dapat mengisi program pada PLC Mitsubishi FX3U digunakan antarmuka GX-Works 2 atau GX-Developer.

### 2.2 Motor DC

Motor DC merupakan salah satu jenis motor listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam konstruksi motor DC terdapat dua bagian utama, yaitu stator, dan rotor. Bagian stator biasanya terdiri dari inti besi yang dililit oleh kumparan sehingga dapat menimbulkan medan magnet. Rotor merupakan bagian yang berputar, sama dengan bagian stator terdapat inti besi yang dililit oleh kumparan sehingga dapat menghasilkan medan magnet.

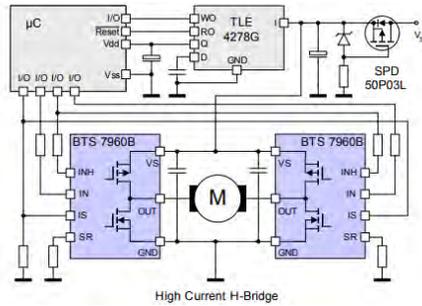
Prinsip kerja motor DC didasarkan pada hukum medan magnet Lorentz, yang menyatakan bahwa bila suatu arus listrik mengalir melalui konduktor dalam medan magnet, maka akan timbul gaya pada konduktor tersebut. Dalam motor DC, medan magnet yang digunakan dapat berasal dari magnet permanen atau elektromagnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang melewati kumparan medan pada stator.

Adapun untuk spesifikasi motor serta pengaduk yang dipakai pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi motor dan pengaduk

No	Parameter	Keterangan
1	Tegangan motor	24VDC
2	Daya motor	120W
3	Kecepatan maks. motor	3500 RPM
4	Tipe pengaduk	<i>Turbine impeller</i>
5	Ukuran pengaduk	Ø 50 mm
6	Jumlah sudu pengaduk	4 sudu
7	Ukuran poros pengaduk	Ø8 mm x 216 mm

### 2.3 Modul Driver Motor DC



Gambar 2. Diagram skematik driver motor DC BTS7960

Pengendalian kecepatan motor DC dapat dicapai dengan bantuan dari modul driver motor DC. Pada penelitian ini digunakan modul driver BTS 7960 yang sudah mendukung pengendalian motor DC hingga 43A. Fungsi utama dari modul driver ini adalah untuk dapat mengkonversi masukan berupa sinyal *pulse width modulation* (PWM) yang sudah dimanipulasi sehingga dapat menghasilkan kecepatan tertentu yang diinginkan.

### 2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

Dalam bidang kendali dan instrumentasi, PWM memiliki peranan penting untuk manipulasi variabel yang dibutuhkan untuk mencapai kebutuhan dari sistem. Prinsip dasar PWM melibatkan pengaturan lebar pulsa dari sinyal yang disebut sinyal PWM. Sinyal ini terdiri dari siklus kerja dan periode. Siklus kerja adalah fraksi dari periode di mana sinyal berada dalam keadaan "aktif" (biasanya tinggi), sementara periode adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus penuh.

### 2.5 Metode PID

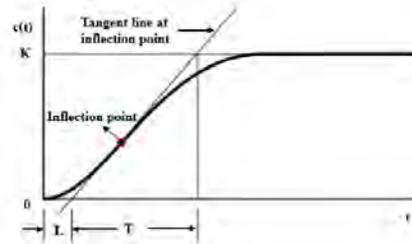
Metode Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID) merupakan metode pengendalian proses yang sudah sangat umum diterapkan pada industri ataupun kebutuhan pengendalian lainnya. Tujuan utama dari diterapkannya metode PID adalah untuk mengurangi kesalahan yang dihasilkan selama proses oleh sistem. Nilai kesalahan tersebut terlebih dahulu direkam menjadi suatu data, kemudian setelah data tersebut terkumpul dan menjadi sebuah grafik maka optimasi dengan menggunakan metode PID dapat diterapkan.

Sebelum dapat melakukan perhitungan PID terlebih dahulu mengetahui rumus aturan dasar perhitungan PID ziegler-nichols, yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rumus aturan dasar PID ziegler-nichols [11]

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Setelah mengetahui aturan dasar PID ziegler-nichols maka dapat mulai perhitungan parameter PID. Tentunya harus memiliki grafik kurva respon awal *plant*. Proses perekaman data dapat memanfaatkan aplikasi akuisisi data seperti Microsoft Excel, PLX DAQ, ataupun aplikasi sejenis sehingga dapat membaca hasil keluaran proses dari PLC. Contoh grafik respon awal dapat dijelaskan pada gambar 4.



Gambar 3. Penjelasan grafik respon awal

Nilai L (waktu mulai) dan T (waktu jeda) sangat diperlukan untuk dapat menghitung parameter PID yang sesuai dengan *plant*. Nilai L adalah waktu yang diperlukan dari *present value* pada saat proses dimulai sampai mencapai titik singgung (*inflection point*). Selanjutnya untuk parameter T merupakan waktu yang diperlukan dari batas akhir nilai L sampai dengan garis perpotongan yang mencapai nilai *setpoint*. Langkah berikutnya jika parameter yang terdapat pada tabel 1 sudah ditemukan maka tinggal memasukkan parameter tersebut ke dalam rumus berikut untuk mencari nilai parameter  $K_i$ , dan  $K_d$ :

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (1)$$

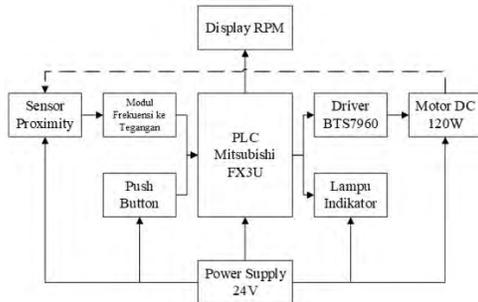
$$K_d = K_p \times T_d \quad (2)$$

Setelah mendapatkan parameter yang telah sesuai dengan perhitungan aturan dasar maka diterapkan kepada sistem, namun apabila ternyata respon sistem masih kurang dari kebutuhan maka dapat dilakukan *trial and error* dengan menyesuaikan parameter PID yang baru dengan berlandaskan pada nilai parameter PID yang awal.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Perancangan Sistem

Proses kerja dari sistem dapat dijelaskan melalui bentuk diagram blok beserta dengan komponen yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 4.

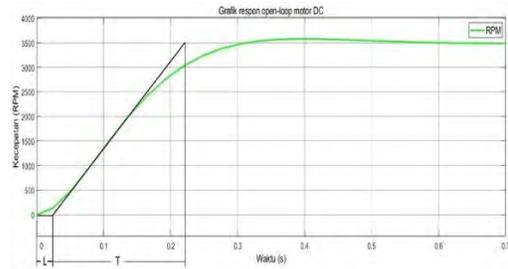


Gambar 4. Diagram blok sistem kendali kecepatan motor

PLC Mitsubishi FX3U digunakan sebagai pengendali utama sistem. Sistem mendapat masukan dari sensor *proximity* terlebih dahulu diproses ke modul konverter frekuensi ke tegangan. Keluaran dari modul konverter tersebut merupakan nilai kecepatan putar motor DC. Kemudian terdapat *push button* yang menjadi masukan untuk mulai operasi proses pengadukan cairan. Setelah sistem mendapat masukan, berikutnya analisa variabel yang dapat dimanipulasi berupa PWM diolah pada PLC FX3U. Hasil pengolahan analisa tersebut kemudian diteruskan ke modul driver BTS7960 dan berupa sinyal PWM. Sinyal PWM tersebut akan memerintahkan motor untuk dapat berputar sesuai dengan nilai yang telah diberikan. Semua komponen beroperasi pada tegangan 24V kecuali untuk driver BTS7960 yang beroperasi pada Tegangan 5V. Proses tersebut akan terus berulang sampai sistem berhenti diberhentikan.

#### 3.2. Perancangan PID

Perancangan PID dimaksudkan untuk mencari nilai parameter awal PID pada *plant* ini. Perancangan dilakukan dengan melakukan perhitungan terhadap data-data *plant* yang telah berhasil diperoleh serta telah dikonversi menjadi bentuk grafik *open-loop* sistem. Adapun untuk grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik respon open-loop sistem

Pada grafik respon tersebut telah diketahui untuk nilai  $L$  sebesar 0,0576s dan nilai  $T$  sebesar 0,2274s. Setelah mengetahui parameter tersebut maka perhitungan mencari nilai parameter PID awal dapat dimulai dengan menggunakan rumus sesuai pada Tabel 2. Perhitungan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

Nilai  $K_p$

$$K_p = 1.2 \times \frac{T}{L}$$

$$K_p = 1.2 \times \frac{0,2274}{0,0576}$$

$$K_p = 4,737$$

Nilai  $T_i$

$$T_i = 2L$$

$$T_i = 2 \times 0,0576$$

$$T_i = 0,1152$$

Maka nilai  $K_i$  adalah

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_i = \frac{4,73}{0,1152}$$

$$K_i = 41,059$$

Nilai  $T_d$

$$T_d = 0,5L$$

$$T_d = 0,5 \times 0,0576$$

$$T_d = 0,0288$$

Maka nilai  $K_d$  adalah

$$K_d = K_p \times T_d$$

$$K_d = 4,73 \times 0,0288$$

$$K_d = 0,136$$

Tabel 3. Nilai awal parameter PID

Parameter	Nilai
$K_p$	4,737
$K_i$	41,059
$K_d$	0,136

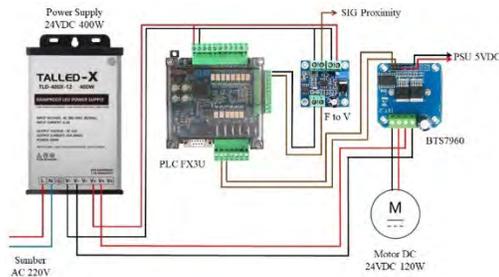
Data yang berada pada Tabel 3 berisi nilai parameter PID awal yang kemudian diterapkan pada sistem. Jika respon dari sistem setelah

diterapkan PID masih dirasa kurang maka dapat mengubah parameter PID dengan tetap berlandaskan pada parameter PID awal tersebut.

### 3.3. Perancangan Pengawatan Sistem

Perancangan pengawatan sistem dibuat untuk mempermudah koneksi kabel yang diperlukan oleh sistem, adapun untuk perancangan pengawatan sistem dapat dilihat pada Gambar 6.

Pengawatan dimulai dengan masukan sumber listrik AC ke catu daya 24V. Setelah itu keluaran DC catu daya akan disalurkan ke seluruh perangkat yang membutuhkan Tegangan 24V. Pastikan untuk penyambungan polaritas agar tidak terbalik karena dapat merusak komponen. Feedback sensor *proximity* masuk ke modul konverter frekuensi ke tegangan. Keluaran dari modul konverter frekuensi ke tegangan disambungkan ke *analog input* PLC untuk menjadi *feedback* sistem berupa kecepatan motor. *Output* PLC terhubung ke modul driver BTS7960 untuk mengendalikan kecepatan motor. Untuk modul driver BTS7960 terhubung ke sumber 24V dan keluaran langsung menuju motor DC.

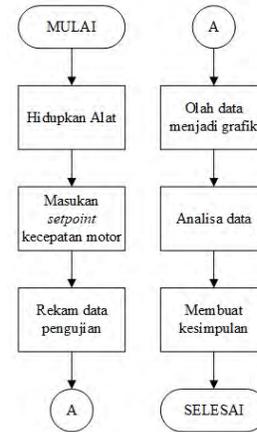


Gambar 6. Pengawatan Sistem

### 3.4. Sistemika Pengujian

Pengujian sistem dari penelitian ini dilakukan dengan tahapan-tahapan untuk menghasilkan keluaran yang sesuai dengan capaian yang dapat diikuti pada diagram alir yang terdapat pada Gambar 7.

Alur pengujian dimulai dengan menghidupkan alat yang akan dipakai. Kemudian masukan nilai *setpoint* kecepatan motor yang akan diuji. Selama proses pengujian berjalan, data proses pengujian direkam. Setelah data proses pengujian didapat, maka data tersebut diolah kedalam bentuk grafik. Analisa dari grafik tersebut dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan. Kesimpulan dibuat setelah analisa selesai dilakukan.



Gambar 7. Sistemika pengujian sistem

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Pengujian Kecepatan Motor Tanpa PID

Pengujian pada kecepatan motor tanpa menggunakan kendali metode PID dilakukan untuk mendapat respon dari sistem saat tidak menggunakan kendali PID. Hasil respon dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik respon kecepatan motor tanpa PID

Pada Gambar 8 nilai *setpoint* diatur pada kecepatan 2000 RPM. Sistem mulai beroperasi untuk mencapai *setpoint* dan berhasil untuk mencapai nilai tersebut. Namun, ketika diberi gangguan kecepatan motor turun drastis dari nilai *setpoint* dan tidak kembali ke nilai *setpoint*. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan metode pengendalian tidak diterapkan sehingga sistem tidak melakukan koreksi terhadap gangguan yang ada. Nilai *error* maksimum dari respon ini ketika diberi gangguan adalah 15,2%. Ketika gangguan pada motor dilepas, maka kecepatan motor kembali ke nilai *setpoint* yaitu 2000 RPM.

## 4.2. Hasil Pengujian Kecepatan Motor Dengan PID

Pengujian kecepatan motor dengan menggunakan pengendalian PID dilakukan untuk mendapatkan grafik respon dari sistem setelah diterapkan metode pengendalian PID. Grafik respon tersebut dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik respon kecepatan motor dengan PID

Pada percobaan ini diatur nilai *setpoint* kecepatan motor pada 2000 RPM. Sistem mulai beroperasi dan mempertahankan kecepatan pada nilai *setpoint*. Kemudian pada saat sistem diberi gangguan kecepatan motor turun namun secara bertahap mulai naik kembali menuju ke nilai *setpoint*. Hal tersebut dapat terjadi karena terdapat koreksi dari sistem untuk menaikkan kecepatan motor yang sudah mulai turun dan menjauhi nilai *setpoint*. Kecepatan motor mulai mencapai nilai *setpoint* kembali, secara bertahap kecepatan motor diturunkan untuk menghindari *overshoot*. Nilai *error* maksimum yang diperoleh untuk kecepatan motor dengan pengendalian PID ini adalah 8,75%.

## 4.3. Analisa

Setelah dilakukan percobaan kecepatan motor tanpa menggunakan PID dan dengan menggunakan PID diperoleh bahwa dengan menggunakan pengendalian PID kinerja sistem memiliki performa yang lebih bagus dibandingkan dengan tanpa menggunakan pengendalian PID. Adapun untuk dapat melihat perbandingan respon dari sistem tanpa PID dan dengan PID dapat dilihat pada Gambar 10.

Perbandingan respon dari sistem terlihat perbedaan yang sangat jelas sesuai dengan grafik yang disajikan pada Gambar 10. Respon tanpa PID memiliki nilai *error* yang besar serta sistem tidak melakukan koreksi terhadap nilai *error* tersebut. Berbeda dengan respon dengan PID yang langsung melakukan koreksi terhadap nilai *error* yang ada pada sistem. Secara keseluruhan penggunaan PID dapat meningkatkan kinerja sistem menjadi lebih baik.



Gambar 10. Grafik perbandingan respon kecepatan motor

## 5. KESIMPULAN

Implementasi kendali PID pada pengendalian kecepatan motor DC pada alat pengaduk cairan viskos telah berhasil dilakukan. Respon dari sistem dengan diterapkan nilai parameter  $K_p$  sebesar 4,717,  $K_i$  sebesar 41,059, dan  $K_d$  sebesar 0,136 menghasilkan nilai *error* 8,75% pada sistem. Dibandingkan dengan respon tanpa PID sebesar 15,2% hasil tersebut sudah dapat meningkatkan kinerja sistem sebesar 64,5%. Untuk dapat mengurangi nilai *error* tersebut menjadi lebih kecil lagi dapat disesuaikan kembali parameter PID yang diterapkan pada sistem.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan pendanaan Tugas Akhir melalui Penelitian Tugas Akhir Mahasiswa Program Sarjana Terapan dan Diploma III Tahun Akademik 2022/2023, sesuai nomor kontrak No.B/275/PL1/HK.02.00/2023

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Suryatini and A. Firasanti, "Kendali P, Pi, Dan Pid Analog Pada Pengaturan Kecepatan Motor Dc Dengan Penalaan Ziegler-Nichols," vol. 6, no. 1.
- [2] R. Muhandian and K. Krismadinata, "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic," *JTEV*, vol. 6, no. 1, p. 328, Feb. 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i1.108034.
- [3] M. Irhas, I. Iftitah, and S. A. Azizah Ilham, "Penggunaan Kontrol Pid Dengan Berbagai Metode Untuk Analisis Pengaturan Kecepatan Motor Dc," *JFT*, vol. 7, no. 1, p. 78, Jun. 2020, doi: 10.24252/jft.v7i1.13846.
- [4] K. Kasmira, A. Waris, and M. T. Sapsal, "Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor DC menggunakan PID

- Controller pada Mesin Pengaduk,” *at*, pp. 81–92, Apr. 2018, doi: 10.20956/at.v1i1i1.90.
- [5] M. F. Al Andzar and R. D. Puriyanto, “PID Control for Temperature and Motor Speed Based on PLC,” *Sig.Img.Proc.Lett*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Mar. 2019, doi: 10.31763/simple.v1i1.150.
- [6] E. L. Talakua, Y. A. K. Utama, and I. Andriyanto, “Optimasi Kontrol Pid Untuk Kendali Kecepatan Motor Dc Menggunakan Metode Metaheuristik”.
- [7] H. M. K. K. M. B. Herath, S. V. A. S. H. Ariyathunge, and H. D. N. S. Priyankara, “Development of a Data Acquisition and Monitoring System Based on MODBUS RTU Communication Protocol,” *IJISRT*, vol. 5, no. 6, pp. 433–440, Jun. 2020, doi: 10.38124/IJISRT20JUN479.
- [8] S. N. Al-Bargothi, G. M. Qaryouti, and Q. M. Jaber, “Speed control of DC motor using conventional and adaptive PID controllers,” *IJECS*, vol. 16, no. 3, p. 1221, Dec. 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1221-1228.
- [9] S. Ekinci, D. Izci, and B. Hekimoglu, “PID Speed Control of DC Motor Using Harris Hawks Optimization Algorithm,” in *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, Istanbul, Turkey: IEEE, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179308.
- [10] D. Somwanshi, M. Bundeale, G. Kumar, and G. Parashar, “Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW,” *Procedia Computer Science*, vol. 152, pp. 252–260, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.05.019.
- [11] K. Ogata, *Modern control engineering*, 5th ed. in Prentice-Hall electrical engineering series. Instrumentation and controls series. Boston: Prentice-Hall, 2010.