

Monitoring Perubahan Tegangan dan Pemodelan Matematika Fungsi Transfer Motor BLDC Dengan System Identification Toolbox

Izza Anshory¹, Dwi Hadidjaja², Indah Sulistiyowati³

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Saintek, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
e-mail: izzaanshory@umsida.ac.id

ABSTRACT

Speed control of Brushless Direct Current (BLDC) motor in electric bicycles has an essential role in increasing energy use efficiency. This research aims to optimize the BLDC motor speed control on electric bikes so that the transient response increases. The method used in this research has several stages; the first is to identify the system through monitoring and recording input and output data. The second stage is to carry out mathematical modeling based on input data and output measurement results. The third stage is to optimize the speed control by tuning the Proportional Integral Derivative (PID) controller parameters. An indicator of successful optimization increased transient responses such as reduced overshoot values, fast rise-time values, and no steady-state error. The results showed that the system hardware could monitor and record data such as voltage, current, and speed changes. There has been an increase in the transient response value after being optimized using a PID controller, namely the rise time value of 0.182 seconds, the settling time of 2.33 seconds, and the overshoot value of 0%.

Keywords: BLDC motor, electric bike, PID controller, optimization

ABSTRAK

Pengaturan kecepatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) di kendaraan sepeda listrik memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Tujuan penelitian ini adalah melakukan optimisasi kontrol kecepatan motor BLDC di sepeda listrik sehingga respon transien semakin meningkat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini ada beberapa tahap, yang pertama melakukan identifikasi sistem melalui *monitoring* dan perekaman data *input* dan *output*. Tahap kedua adalah melakukan pemodelan matematika berdasarkan data *input* dan *output* hasil pengukuran. Dan tahap ketiga adalah melakukan optimisasi kontrol kecepatan melalui penalaan parameter kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID). Indikator keberhasilan optimisasi adalah terjadinya peningkatan respon transien seperti berkurangnya nilai *overshoot*, nilai *rise-time* yang cepat, dan tidak memiliki error steady-state. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *hardware* sistem mampu melakukan *monitoring* dan perekaman data seperti perubahan tegangan, arus dan kecepatan. Selain itu telah terjadi peningkatan nilai respon transien setelah dioptimisasi dengan menggunakan kontroler PID, yaitu nilai *rise time* sebesar 0.182 seconds, settling time sebesar 2.33 seconds, dan nilai *overshoot* 0 %.

Kata kunci: motor BLDC, sepeda listrik, kontrol PID, optimisasi

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah pemakaian kendaraan berbahan bakar fosil yang berlebihan di kota-kota besar yang membengkak tiada henti, karena masyarakat secara tidak masuk akal membeli skuter, sepeda motor dan mobil sehingga menyebabkan pencemaran udara[1]. Hal inilah yang merupakan alasan utama dilakukan identifikasi kebutuhan untuk menemukan dan memodifikasi kendaraan listrik. Ada beberapa jenis kendaraan listrik yang saat ini banyak dikembangkan dan dilombakan seperti mobil listrik. Sayangnya mobil listrik cenderung mahal, terutama karena biaya perakitan aki. Mobil listrik memiliki empat tempat duduk yang digunakan untuk mengangkut satu orang juga boros energi, meski mungkin lebih sedikit dibandingkan dengan kendaraan bermesin bensin. Mobil listrik membutuhkan tempat parkir seperti halnya kendaraan yang ada, dan dengan demikian tidak akan menyelesaikan masalah parkir kampus[2]. Kendaraan ini juga mahal dalam hal asuransi (terutama untuk pengemudi yang lebih muda), memerlukan pembayaran pajak jalan raya (atau yang setara di berbagai negara), dan biasanya mengharuskan pengemudi untuk memiliki

surat izin yang masih berlaku. Sebaliknya, sepeda tidak memerlukan asuransi, tidak menarik pajak jalan raya, dan biasanya tidak memerlukan izin berkendara di sebagian besar negara.

Oleh karena itu sebagai solusi terbaik dan ekonomis adalah kendaraan sepeda listrik, yang merupakan pendukung kemajuan lingkungan dan alternatif yang terjangkau secara ekonomis akan menjadi solusi terbaik. Bagian umum dari Sepeda Listrik adalah *Brushless DC Motor* (Hub Motor), *Throttle (Accelerator)*, *Battery Storage* (12 V), *Chain Drive*, *Frame* dan suku cadang sepeda umum lainnya[3]. Sepeda listrik ada dua bagian sesuai dengan fungsinya dan cara kerjanya: *Power on Demand* dan *Pedal Assist*. Motor diaktifkan oleh *Throttle* dengan *power-on-demand*, biasanya dipasang di stang serta pada skuter atau sepeda motor umum[3]. Dengan mengayuh motor listrik dapat dikontrol dengan pedal-assist.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk membuat sebuah alat *prototype* kontrol *monitoring* perubahan tegangan di sepeda listrik, karena perubahan *Throttle* untuk dilakukan pemodelan matematika dan optimisasi kontrol kecepatannya menggunakan kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pertama membuat desain *hardware prototype* kontrol kecepatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC), kedua melakukan identifikasi sistem untuk mendapatkan data *input* dan *output*, dan yang ketiga melakukan optimisasi dengan menggunakan kontrol PID.

Penelitian yang berkaitan dengan sepeda listrik telah banyak dilakukan oleh para peneliti, diantaranya tentang bagian-bagian apa saja yang menyusun kendaraan sepeda listrik, pemodelan matematika motor BLDC sebagai penggerak sepeda listrik, sepeda listrik yang bertenaga hibrida dengan melibatkan tiga cara berbeda untuk mengisi baterai seperti tenaga surya, dinamo, dan pengisian daya dinding AC 220V[4]. Daya dari ketiga mode ini digunakan untuk mengisi daya motor *Permanent Magnetic Motor Direct Current* (PMDC) yang menjalankan sepeda. Sepeda bertenaga *hybrid* dirancang sedemikian rupa sehingga pengendara dapat memiliki mode pengoperasian sepeda yaitu ia dapat memilih sepeda yang akan dikendarai sepenuhnya dengan motor listrik PMDC atau dapat digerakkan secara manual oleh dirinya sendiri. Identifikasi sistem motor BLDC dengan menggunakan metode fungsi transfer.

Pada penelitian ini membahas tentang perancangan *prototype monitoring* perubahan tegangan sepeda listrik yang terhubung dengan *personal computer* (PC) untuk optimisasi kontrol kecepatan motor BLDC.

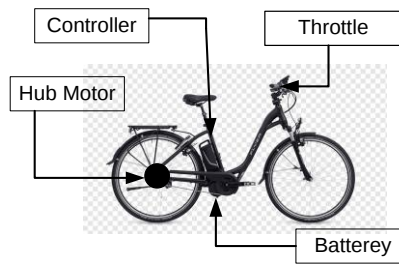
TINJAUAN PUSTAKA

Pada tinjauan pustaka tentang pembuatan *prototype* kendaraan sepeda listrik ini akan dibahas beberapa hal, diantaranya adalah bagian-bagian sepeda listrik, motor BLDC, identifikasi sistem, dan kontroler PID.

Sepeda Listrik

Sepeda listrik semakin mendapat perhatian di seluruh dunia, terutama di China, Eropa, Jepang, Taiwan, Amerika Serikat, dan Indonesia. Secara umum bagian-bagian dari sepeda listrik adalah motor *Brushless DC (hub motor)*, *Throttle (Accelerator)*, *battery storage* (12 V), *Chain Drive*, *frame* dan suku cadang sepeda umum lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 dapat dijelaskan bahwasanya penulis membahas tentang komponen penting dan eksperimen dari sepeda listrik, yaitu *alternator/throttle*, *hub motor* (motor BLDC), kontroler, dan baterai. Pertama, *alternator* yang merupakan perangkat elektromekanis yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Komponen utama yang kedua yaitu, ada banyak jenis yang telah diuji hingga saat ini tetapi yang populer antara lain baterai NiMH, Ni, atau Lithium-ion[5]. Kapasitas baterai berbeda-beda pada sepeda. Secara umum energi penyimpanan sebagian besar mencapai sekitar 400 Watt. Kualitas baterai diukur dengan berapa banyak siklus yang dapat mereka isi, dan berapa persentase yang masih berfungsi setelah durasi durasi tetap, yang diukur dengan membandingkan dengan kapasitas asli pada waktu pembuatan.



Gambar 1. Bagian-bagian sepeda listrik

Komponen ketiga adalah kontroler yaitu suatu komponen yang berfungsi mengatur tegangan keluaran dari sumber tegangan DC. sebelum disuplai ke baterai. Rangkaian kontroler merupakan rangkaian konverter tegangan DC menjadi sumber tegangan AC [6].

Motor BLDC

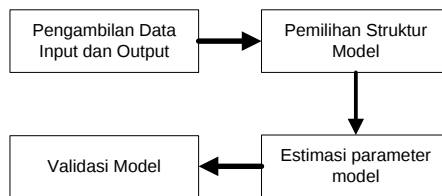
Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah motor sinkron yang terdiri dari lilitan jangkar pada stator permanen dan magnet pada rotor. Stator motor BLDC terdiri dari laminasi baja bertumpuk dengan lilitan ditempatkan di slot dan belitan stator ini dapat diatur dalam dua pola yaitu pola bintang atau pola delta [7]. Perbedaan utama antara kedua pola tersebut adalah bahwa pola bintang memberikan torsi tinggi pada RPM rendah dan pola delta memberikan torsi rendah pada RPM rendah[8]. Ada banyak keunggulan motor BLDC seperti karakteristik kecepatan versus torsi yang lebih baik, respons dinamis tinggi, efisiensi tinggi, masa pengoperasian yang lama, pengoperasian tanpa suara, rentang kecepatan yang lebih tinggi [9].

Biasanya, motor BLDC memiliki belitan tiga fasa yang digulung dalam bentuk bintang atau delta dan membutuhkan jembatan inverter tiga fasa untuk pergantian elektronik. Motor *Brushless* umumnya dikontrol menggunakan jembatan semikonduktor daya tiga fasa. Motor memerlukan sensor posisi rotor untuk memulai dan menyediakan urutan pergantian yang tepat untuk menghidupkan perangkat daya di jembatan *inverter* [10].

Identifikasi Sistem

Terdapat beberapa teknik untuk memperoleh model sistem motor BLDC melalui eksperimen. Salah satunya dengan mengamati data masukan dan keluaran dari motor BLDC tersebut. Untuk memahami dan mempelajari atribut-atribut pada sistem diperlukan pengenalan sistem yang diperoleh melalui pemodelan matematis berdasarkan atribut Komponennya. Berdasarkan hasil pengenalan ini diperoleh fungsi transfer. Melalui model fungsi transfer ini, kita bisa melihat Sifat respons sistem terhadap berbagai masukan. Berdasarkan pengetahuan tentang sifat sistem, operasi atau perawatan yang tepat dapat ditentukan untuk menjalankan sistem Seperti yang diharapkan[11]. Identifikasi sistem merupakan metode eksperimental untuk menentukan model dinamik sistem.

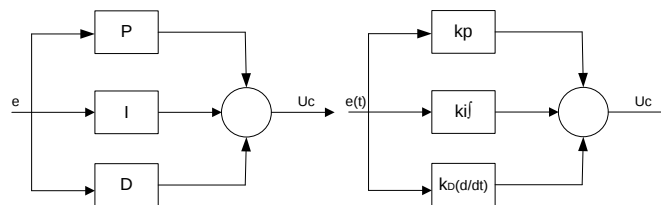
Dalam suatu sistem kendali, identifikasi sistem biasanya dapat digambarkan seperti pada Gambar 2. Tahapan proses identifikasi sistem meliputi empat tahapan yaitu ketersediaan *input* pabrik dan data *output* yang akan diperoleh. Setelah konfirmasi, yang kedua adalah pemilihan struktur model, dan yang ketiga adalah estimasi parameter model. Keempat, memverifikasi struktur dan model yang ditentukan Nilai parameternya.



Gambar 2. Struktur umum motor BLDC

Kontroler PID

Metode kendali *Proporsional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu metode kendali yang banyak digunakan dalam elektro industri. Pengontrol ini memiliki parameter tiga pengontrol yaitu konstanta proporsional (K_p), Konstanta Integral (K_i), dan Konstanta *Derivative* (K_d)[12]. Dalam metode PID konvensional, ketiga parameter ini diturunkan dari perhitungan matematis. Struktur kontrol PID secara umum digambarkan pada Gambar 3.



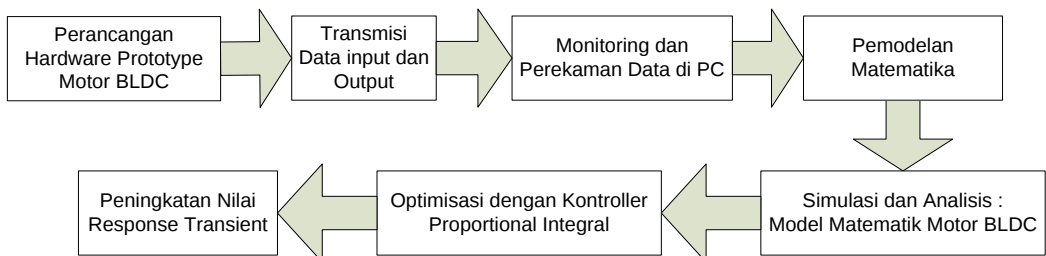
Gambar 3. Struktur Kontroler PID.

Sedangkan untuk persamaan umum kontroler PID ditunjukkan pada persamaan (1).:

$$u_c(t) = k_p e(t) + k_i \int^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \dots\dots(1)$$

METODE PENELITIAN

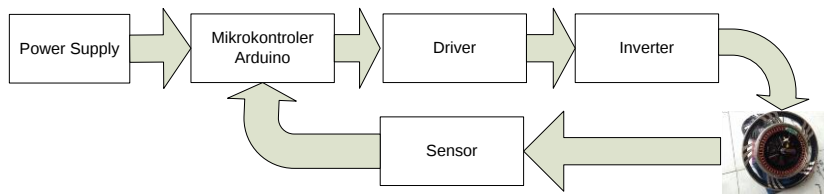
Metode yang digunakan dalam penelitian ini, digambarkan dalam blok diagram berikut :



Gambar 4. Blok Diagram *Monitoring* Perubahan Tegangan Motor BLDC

Monitoring Perubahan Tegangan Motor BLDC

Perancangan *hardware* untuk *monitoring* perubahan tegangan pada sistem kontrol kecepatan sistem motor BLDC digambarkan dalam blok diagram berikut ini :

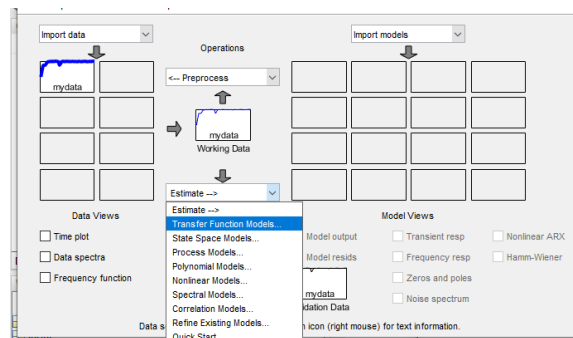


Gambar 5. *Hardware Monitoring* Perubahan Tegangan

Pada Gambar 5 menjelaskan tentang perancangan *prototype hardware* untuk mendapatkan data *input* dan *output* di sistem kontrol kecepatan motor BLDC. Data *input* dan *output* yang diukur yaitu tegangan, arus, dan kecepatan. Perubahan tegangan hasil perubahan mekanik pada throttle akan diidentifikasi yang nantinya menyebabkan perubahan kecepatan. Data hasil perubahan tersebut teridentifikasi hasilnya dan termonitor di *Personal computer*.

System Identification Toolbox (SIT)

System Identification Toolbox (SIT) merupakan sebuah aplikasi software yang terdapat di program Matlab untuk mendapatkan model matematika. SIT dapat digunakan sebagai alat identifikasi yang dijelaskan pada Gambar 10, yaitu menggunakan antarmuka pengguna grafis (GUI) untuk mensimulasikan dan menganalisis sistem dinamis. Data *input* dan *output* hasil pengukuran diinputkan, disimulasikan dan disimulasikan sehingga didapatkan model matematika sesuai dengan struktur model yang dipilih seperti Gambar 6.



Gambar 6. *System Identification Toolbox* untuk Data *Input* dan *Output*

Hasil data *input* dan *output* digunakan sebagai dasar untuk memodelkan matematika melalui *system identification toolbox* di program Matlab.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian untuk *monitoring* perubahan tegangan terdapat beberapa tahapan, yaitu tahap pertama berfungsinya *hardware* hasil integrasi perancangan sistem elektronika untuk mendapatkan data *input* dan *output*. Tahap kedua yaitu pengambilan data *input* dan *output* untuk dimodelkan secara matematika melalui *System Identification Toolbox* (SIT). Tahap ketiga adalah melakukan optimisasi pada sistem persamaan matematika dalam bentuk persamaan fungsi laplace.

Hasil perancangan *hardware*

Hasil installasi dan perancangan sistem elektronika untuk *monitoring* perubahan tegangan pada sistem kontrol kecepatan motor BLDC ditunjukkan pada Gambar 7.

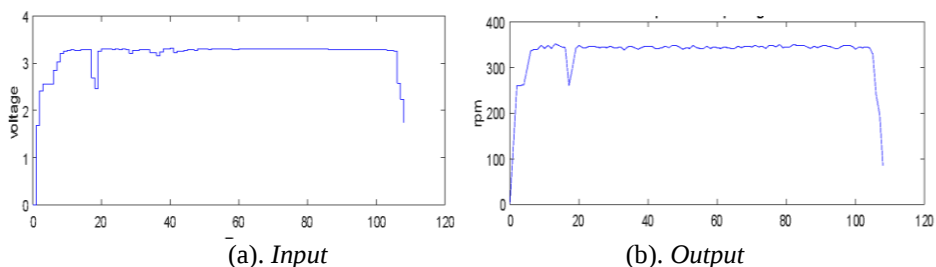


Gambar 7. Hardware Monitoring Perubahan Tegangan Motor BLDC

Dan setelah diaktifkan semua komponen sensor, *power supply*, driver kontroler, motor BLDC, dan komputer, maka didapatkan data hasil pengukuran *input* dan *output* yaitu tegangan, arus, dan kecepatan putar motor.

Identifikasi Sistem Motor BLDC

Data hasil pengujian, kemudian diolah dan dianalisis menggunakan aplikasi pemrograman Matlab, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Data *Input* dan *Output* Motor BLDC

Dari Gambar 4.2. dapat dijelaskan bahwasanya perubahan tegangan *input* pada throttle dengan range 1,2V – 3.5 Volt berkorelasi dengan perubahan kecepatan putar motor BLDC dengan range 350 rpm, yang ditunjukkan adanya ketidakstabilan dalam kecepatan putar motor tersebut. Hasil pengukuran data *input* dan *output* motor BLDC tersebut, kemudian disimulasikan dengan menggunakan tools di program aplikasi Matlab *System Identification Toolbox* (SIT), serta dengan memilih struktur model *transfer function*. *Transfer function* sebagai rasio perbandingan dari $Y(s)$ dan $U(s)$, didefinisikan sesuai dengan persamaan 2.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \dots \dots (2)$$

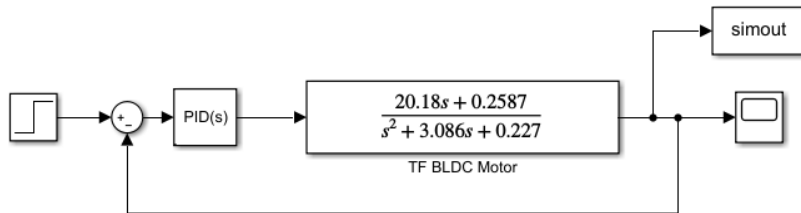
Sehingga didapatkan persamaan matematika dalam bentuk persamaan fungsi laplace seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3).

$$G(s) = \frac{20.18s + 0.2587}{s^2 + 3.086s + 0.227} \dots \dots (3)$$

Optimisasi dengan Kontroler PID

Persamaan matematika dalam bentuk fungsi laplace sebagai bentuk model matematika hasil identifikasi motor *Brushless Direct Current* (BLDC) dilihat performansi kinerjanya dengan

menggunakan kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID). Blok simulink untuk melihat performansi kinerjanya ditunjukkan pada Gambar 9.

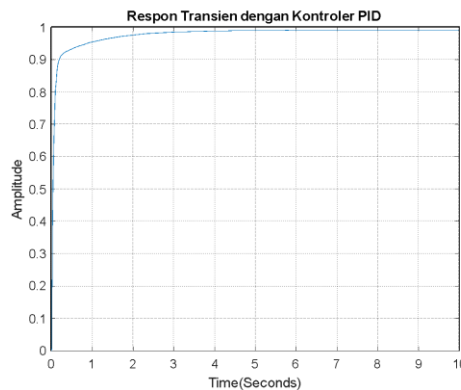


Gambar 9. Blok Simulink Optimisasi Motor BLDC dengan Kontroler PID

Hasil simulasi dari pengujian kontrol kecepatan motor BLDC dengan menggunakan kontroler PID diperoleh grafik respon transien seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sedangkan untuk performansi respon transiennya pada saat nilai $k_p=0.85$, $k_i=1.1$, dan $k_d= 0.13$, diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Response Transient dengan kontroler PID

Parameter Kinerja Sistem	Nilai
<i>Rise time</i>	0,182 detik
<i>Settling Time</i>	2,33 detik
<i>Overshoot</i>	0%
<i>Peak</i>	0,99



Gambar 10. Grafik Respon Transien Optimisasi dengan Kontroler PID

KESIMPULAN

Sepeda listrik sebagai kendaraan alternatif untuk mengurangi adanya peningkatan penggunaan konsumsi bahan bakar minyak bumi, perlu terus dilakukan inovasi dan pengembangan. Salah satu pengembangannya adalah melakukan *monitoring* perubahan tegangan yang berkorelasi dengan perubahan kecepatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwasanya perubahan tegangan karena disebabkan perubahan mekanis dari *Throttle* menyebabkan perubahan kecepatan putar motor BLDC. Hal ini dibuktikan dengan adanya perekaman data *input* dan *output*. Selain itu, data hasil pengukuran *input* dan *output* berhasil didapatkan model matematika dalam bentuk fungsi transfer. Persamaan model matematika ini digunakan sebagai dasar optimisasi kontrol kecepatan motor BLDC, dan hasilnya menunjukkan respon transien yang baik. Hal ini

dibuktikan dengan indikator nilai *rise time* sebesar 0.182 seconds, *settling time* sebesar 2.33 seconds, dan nilai *overshoot* 0 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, khususnya DRPM yang telah memberikan dukungan pembiayaan untuk Penelitian Internal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Florez *et al.*, “Development of a bike-sharing system based on pedal-assisted electric bicycles for bogota city,” *Electron.*, vol. 7, no. 11, 2018.
- [2] I. V. McLoughlin *et al.*, “Campus Mobility for the Future: The Electric Bicycle,” *J. Transp. Technol.*, vol. 02, no. 01, pp. 1–12, 2012.
- [3] I. Anshory, D. Hadidjaja, and R. B. Jakaria, “Blcdc Motor : Modeling and Optimization Speed Control Using Firefly Algorithm,” *Dinamik*, vol. 25, no. 2, pp. 51–58, 2020.
- [4] S. A. K. Mozaffari Niapour, G. Shokri Garjan, M. Shafiei, M. R. Feyzi, S. Danyali, and M. Bahrami Kouhshahi, “Review of Permanent-Magnet *Brushless* DC motor basic drives based on analysis and simulation study,” *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 930–957, 2014.
- [5] H. B. Suryadipraja, J. Jamaaluddin, T. Elektro, and U. M. Sidoarjo, “Pengoptimalan Penggunaan Sensor Uvitron Pada Robot Berkaki Dalam Mendeteksi Keberadaan Titik Api Dengan Sebuah Lilin,” pp. 206–210.
- [6] I. Anshory and I. Robandi, “Identification and Optimization Speed Control of BLDC Motor Using Fuzzy Logic Controller,” vol. 7, pp. 267–271, 2018.
- [7] B. Kumar, S. K. Swain, and N. Neogi, “Controller Design for Closed Loop Speed Control of BLDC Motor,” vol. 9, no. 1, 2017.
- [8] I. D. . Karyatanti, B. Dewantara, and D. Rahmataullah, “Turn To Turn Short Circuit Classification In Induction Motor Stator Windings Caused By Isolation Failure Using Neural Network (NN) Method,” *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng. UMSIDA)*, vol. 4, no. 2, pp. 102–114, 2020.
- [9] I. Anshory, I. Robandi, and Wirawan, “Monitoring and optimization of speed settings for *Brushless* Direct Current (BLDC) using Particle Swarm Optimization (PSO),” in *Proceedings - 2016 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2016*, 2016.
- [10] G. S. Shehu, A. B. Kunya, I. H. Shanono, and T. Yalcinoz, “A Review of Multilevel Inverter Topology and Control Techniques,” vol. 4, no. 3, pp. 233–241, 2016.
- [11] S. Rachad, H. Fouraiji, and B. Bensassi, “Identification approach for a production system using ARX model,” *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Logist. Oper. Manag. GOL 2014*, pp. 93–97, 2014.
- [12] M. A. Ibrahim, A. K. Mahmood, and N. S. Sultan, “Optimal PID controller of a *Brushless* DC motor using genetic algorithm,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 822–830, 2019.