

KENDALI PROPORSIONAL INTEGRAL PADA KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT

Muhammad Imbarothur Mowaviq^{1*}, Erlillah Rizqi Kusuma Pradani², Irfin Sandra Asti³, Delila Cahya Permatasari⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

Keywords:

BLDC, PI Controller, Hall Sensor

Correspondent Email:

muhammad.imbarothur@polinema.or.id



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstrak. Motor Arus Searah Tanpa Sikat atau Brushless Direct Current (BLDC) telah menjadi teknologi penggerak fundamental dalam berbagai industri modern, mulai dari otomotif hingga kedirgantaraan, berkat efisiensinya yang superior dan masa pakai operasional yang panjang. Operasi presisi motor BLDC sangat bergantung pada informasi posisi rotor yang akurat, yang disediakan oleh hall sensor. Sensor ini mengirimkan sinyal ke unit pengendali yang melakukan komutasi elektronik untuk menggerakkan motor. Namun, untuk mencapai respons sistem yang optimal, diperlukan penerapan sistem kendali tambahan. Penelitian ini berfokus pada perancangan, implementasi, dan analisis kinerja kendali Proporsional Integral (PI) untuk mengatur kecepatan motor BLDC. Hasil simulasi menunjukkan respons sistem terhadap input step dengan setpoint 500 rpm. Kecepatan motor berhasil mencapai 450 rpm dalam waktu 0,3 detik, namun baru benar-benar stabil pada setpoint 500 rpm setelah mencapai detik ke-2,5. Hasil respons juga menunjukkan adanya ripple atau riak pada kecepatan motor meskipun tidak signifikan, yang disebabkan oleh faktor non-linear yang melekat pada sistem pengontrolan motor BLDC.

Abstract. Brushless Direct Current (BLDC) motors have become a fundamental drive technology in various modern industries, from automotive to aerospace, thanks to their superior efficiency and long operational life. The precision operation of BLDC motors is highly dependent on accurate rotor position information, which is provided by hall sensors. These sensors send signals to a control unit that performs electronic commutation to drive the motor. However, to achieve optimal system response, the implementation of an additional control system is required. This research focuses on the design, implementation, and performance analysis of Proportional Integral (PI) control to regulate the speed of BLDC motors. Based on this target, a proportional control of 0.01990 and an integral gain of 3.29063 are obtained. The simulation results show the system response to a step input with a setpoint of 500 rpm. The motor speed successfully reached 450 rpm in 0.3 seconds, but only stabilized at the setpoint of 500 rpm after reaching 2.5 seconds. The response results also showed ripples in the motor speed, although not significant, caused by non-linear factors inherent in the BLDC motor control system.

1. PENDAHULUAN

Motor Brushless Direct Current (BLDC) telah menjadi teknologi penggerak utama dalam

berbagai industri modern yang menuntut efisiensi tinggi. Aplikasinya sangat luas, mulai dari sektor otomotif seperti pada kendaraan

listrik [1], [2], [3], [4], hingga industri kedirgantaraan yang memerlukan keandalan tinggi[5]. Selain itu, teknologi ini juga sangat populer di tingkat konsumen, terutama pada penggunaan sepeda listrik [1] dan berbagai perangkat lainnya, yang menunjukkan fleksibilitas dan keunggulan performa motor jenis ini di berbagai skala.

Keunggulan utama yang mendorong adopsi motor BLDC secara masif adalah efisiensinya yang superior dan waktu hidup operasional yang lebih panjang. Hal ini dimungkinkan karena desainnya yang inovatif tanpa menggunakan sikat arang (brushless), sehingga mengurangi gesekan dan keausan komponen internal. Berbeda dengan motor induksi [6], motor BLDC dapat didefinisikan sebagai motor sinkron yang menggunakan magnet permanen, dengan salah satu karakteristik khasnya adalah bentuk gelombang back EMF yang menyerupai trapezoid [7].

Back EMF (Electromotive Force) atau Gaya Gerak Listrik Balik merupakan fenomena fundamental dalam operasional motor BLDC. Fenomena ini muncul sebagai tegangan yang terinduksi pada kumparan motor, dengan arah yang berlawanan dengan tegangan sumber. Penyebab utama terjadinya back EMF adalah adanya gerakan relatif antara medan magnet dari rotor (bagian yang berputar) dan kumparan statis di dalam motor, yang merupakan prinsip dasar induksi elektromagnetik.

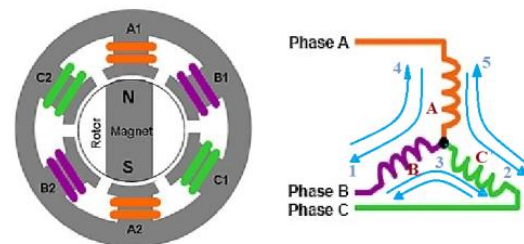
Untuk dapat berputar secara presisi dan efisien, motor BLDC memerlukan informasi akurat mengenai posisi putaran rotor setiap saat. Fungsi vital ini dijalankan oleh hall sensor[8]. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip efek Hall, di mana medan magnet dapat membelokkan aliran listrik pada sebuah pelat konduktor. Dengan mendeteksi perubahan medan magnet dari rotor yang berputar, hall sensor mengirimkan sinyal posisi ke unit pengendali motor, yang kemudian mengatur aliran listrik ke kumparan yang tepat untuk menghasilkan putaran yang mulus dan terkontrol [6].

Secara keseluruhan, komponen-komponen ini bekerja dalam sebuah sistem loop tertutup yang cerdas. Sinyal dari hall sensor diterima oleh unit pengendali elektronik (controller) yang bertindak sebagai otak dari motor. Berdasarkan

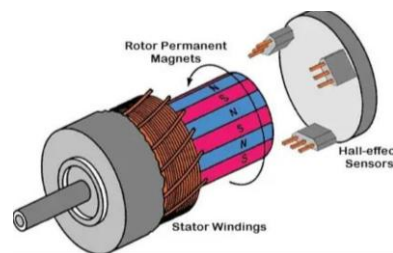
data posisi ini, pengendali melakukan komutasi elektronik, yaitu mengalihkan aliran listrik secara berurutan ke set kumparan yang berbeda. Untuk mendapatkan respon yang terbaik dari sistem, maka perlu ditambahkan kendali. Salah satu kendali yang bisa diterapkan adalah kendali proporsional integral [9]

2. TINJAUAN PUSTAKA

Motor BLDC merupakan motor sinkron dengan magnet permanen yang dicatu menggunakan tegangan DC. Belitan berada pada sisi stator dan permanen magnet sebagai rotor. Struktur dalam motor BLDC, seperti ditunjukkan pada Gambar 1, setidaknya terdapat tiga fasa yang masing-masing dicatu bergantian mengikuti perubahan medan magnet akibat adanya gerakan pada rotor. Untuk mendeteksi posisi medan magnet rotor dapat menggunakan hall sensor yang terpasang pada shaft motor seperti pada Gambar 2.



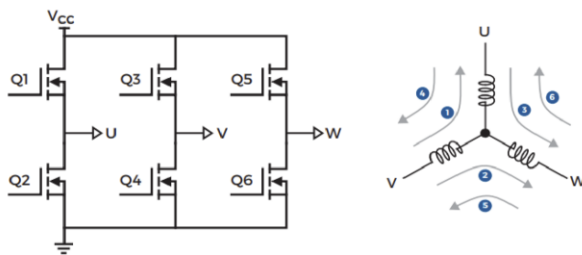
Gambar 1. Struktur dalam Motor BLDC [10]



Gambar 2. Hall Sensor dalam Motor BLDC [11]

Untuk menggerakkan motor BLDC, maka diperlukan metode pensaklaran menggunakan 6 buah Mosfet yang bekerja secara bergantian mengikuti informasi dari hall sensor. Hall sensor mendeteksi posisi putaran motor dan akan mengirimkan ke mikrokontroler. Hasil pembacaan hall sensor akan dilakukan komutasi di dalam mikrokontroler untuk menentukan saklar mana saja yang on.

Penyusunan saklar Mosfet dapat dilihat pada Gambar 3. Q1-Q3 merupakan saklar tinggi dan Q4-Q6 adalah saklar rendah. Langkah pertama saat hall sensor B dan C mendeteksi posisi rotor, tegangan DC akan mengalir melalui saklar Q2 ke motor dan melewati saklar Q4. Selanjutnya, rotor akan bergerak sejajar dengan hall sensor C dan saklar Q2 dan Q6 akan menyala. Secara detail relasi antara sensor hall effect dengan saklar mosfet dapat dilihat pada Tabel 1. Sehingga, motor akan berputar dengan mengikuti perubahan deteksi hall sensor dan perubahan penyalan Mosfet.



Gambar 3. Rangkaian Pensaklaran pada Motor BLDC [12]

Tabel 1. Tabel Pensaklaran MOSFET [13]

Sensor Hall			Saklar MOSFET					
HA	HB	HC	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	1	0

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pemodelan Motor BLDC

Motor BLDC (tanpa mempertimbangkan detail control komutasi) secara prinsip mirip dengan motor DC dalam hal persamaan dinamikanya. Pada sisi elektriknya dapat diperoleh persamaan

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + K_e \omega(t) \quad (1)$$

$V(t)$ merupakan tegangan dalam volt, L adalah induktansi lilitan dalam henry, R resistansi lilitan (Ω), $i(t)$ arus fasa dalam ampere, K_e adalah konstanta back-EMF dalam $(V)/(rad/s)$, dan $\omega(t)$ adalah kecepatan sudut rotor dalam rad/s . Sedangkan, bagian mekaniknya persamaan yang mewakilinya adalah

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = K_t i(t) \quad (2)$$

J adalah momen inersia rotor ($kg.m^2$), B koefisien friksi viskos ($N.m.s$), dan K_t adalah konstanta torsi ($N.m/A$).

Dari persamaan diferensial (1) dan (2), maka dapat disusun fungsi alih system dalam domain s . Berdasarkan persamaan mekanik (2) dan (1) diperoleh

$$i(s) = \frac{Js + B}{K_t} \cdot \omega(s) \quad (3)$$

$$V(s) = Lsi(s) + Ri(s) + K_e \omega(s) \quad (4)$$

Dengan substitusi (3) pada (4) didapatkan

$$V(s) = (Ls + R) \frac{Js + B}{K_t} \cdot \omega(s) + K_e \omega(s) \quad (5)$$

$$V(s) = \left[\frac{(Ls + R)(Js + B)}{K_t} + K_e \right] \omega(s) \quad (6)$$

Sehingga, fungsi alih kecepatan terhadap tegangan dalam orde dua adalah

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(LJ)s^2 + (LB + RJ)s + (RB + K_t K_e)} \quad (7)$$

Karena dinamika listrik sangat cepat, maka kita bisa dekari dengan orde-1 dalam bentuk

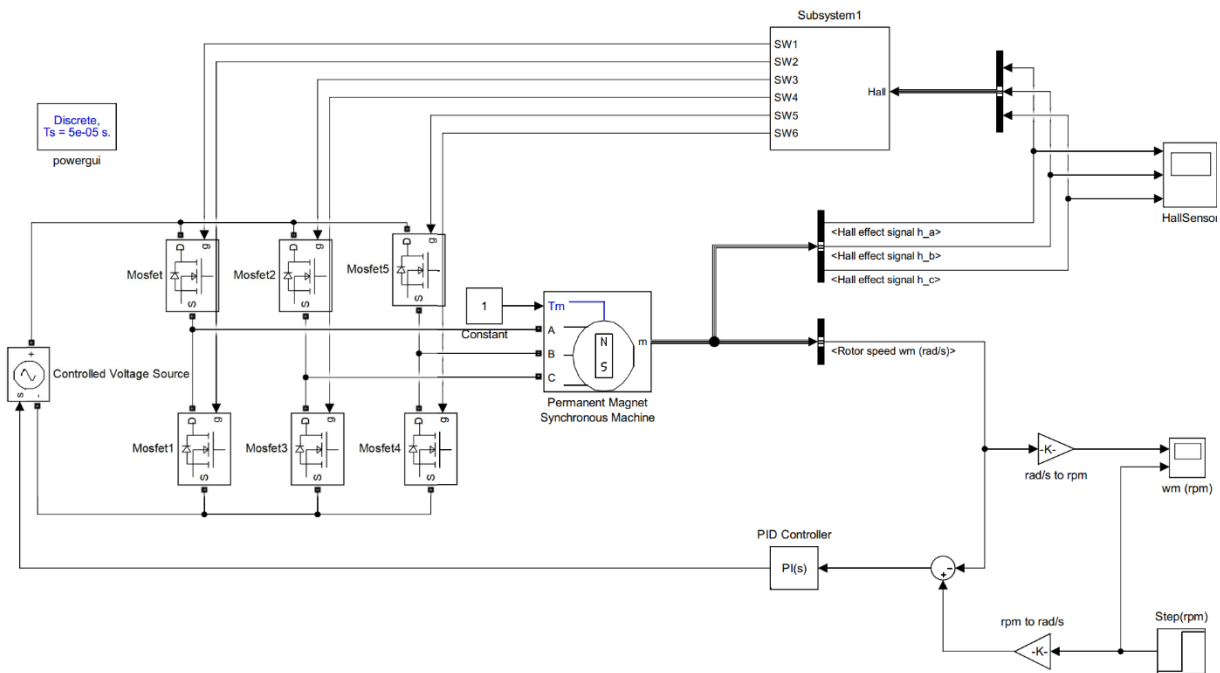
$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (8)$$

dengan

$$K = \frac{K_t}{RB + K_e K_t} \quad \text{dan} \quad \tau = \frac{RJ + LB}{RB + K_e K_t} \quad (9)$$

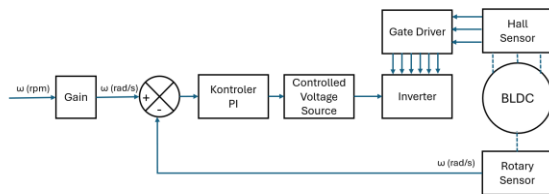
Tabel 2. Parameter Motor BLDC

Parameter	Nilai
R	$0,2 \Omega$
L	$5,0 \times 10^{-4} H$
K_e	$0,08 V.s/rad$
K_t	$0,08 N.m/A$
J	$5,0 \times 10^{-4} kg.m^2$
B	$5,0 \times 10^{-4} N.m.s/rad$



Gambar 4. Diagram Simulasi Menggunakan Simulink MATLAB

3.1. Desain Dendali PI



Gambar 5. Diagram Blok Sistem Kendali

Pada Gambar 4. ditunjukkan diagram blok sistem kendali Proporsional Integral pada motor BLDC dengan hall sensor. Adapun desain kendali Proporsional Integral dapat dilakukan dengan melakukan beberapa langkah berikut.

Dengan mengasumsikan beberapa nilai parameter seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan mensubstitusikan pada (8) dan (9) dapat diperoleh nilai fungsi alih kecepatan (rad/s) terhadap tegangan (V) yaitu

$$G(s) = \frac{12.4805}{0.0156045s + 1} \quad (10)$$

Dengan memilih maksimum overshoot $M_p = 0.02$ dan settling time $t_s = 0.1s$ maka dengan menggunakan formula [14]

$$M_p = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (11)$$

Diperoleh damping ratio

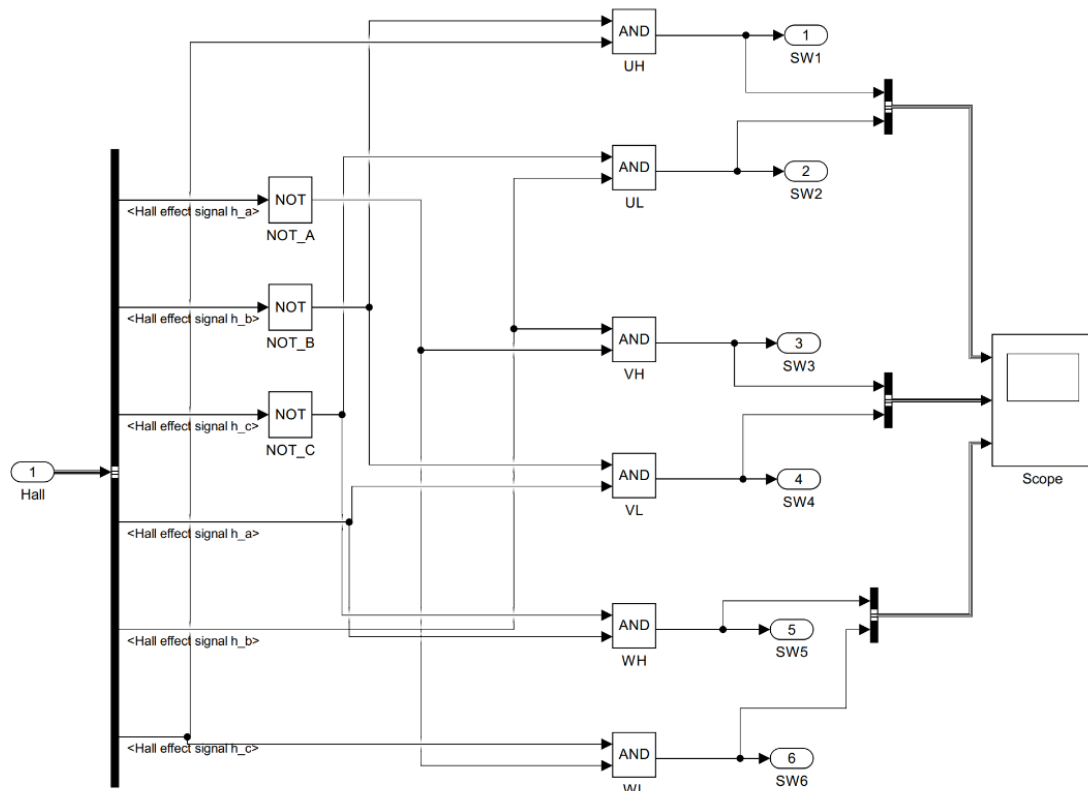
$$\zeta \approx 0,7797 \quad (12)$$

Dan untuk aturan error steady state 2% dengan menggunakan formula

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (13)$$

Maka diperoleh

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s} \approx \frac{4}{0,7797 \cdot 0,1} \approx 51.3016 \frac{rad}{s} \quad (14)$$



Gambar 6. Logika Komutasi pada Blok Subsistem

Dengan menggunakan persamaan orde-2 yang diinginkan

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (15)$$

didapatkan koefisien polinom[15]

$$a_1 = 2\zeta\omega_n \approx 80, \quad a_0 = \omega_n^2 \approx 2631.851. \quad (16)$$

Dengan plant

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \text{ dengan} \\ k = 12,4805, \tau = 0,0156045 \quad (17)$$

Dan persamaan

$$a_1 = \frac{1 + kK_p}{\tau}, \quad a_0 = \frac{kK_i}{\tau} \quad (18)$$

Maka

$$K_p = \frac{a_1\tau - 1}{k}, \quad K_i = \frac{a_0\tau}{k} \quad (19)$$

Sehingga diperoleh nilai kendali

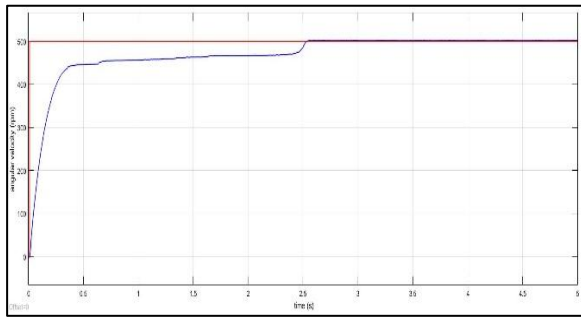
$$K_p = 0,01990 \quad K_i = 3.29063 \quad (20)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan menggunakan aplikasi Simulink pada software MATLAB

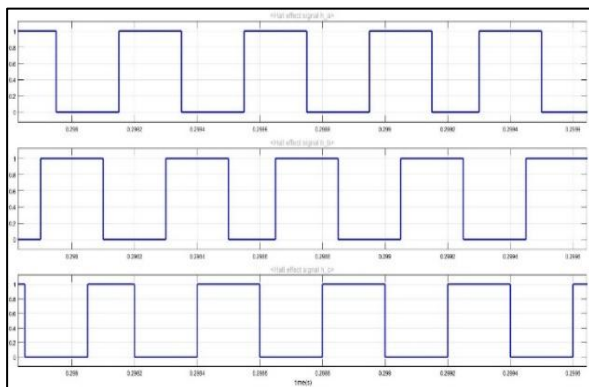
seperti pada Gambar 5. Penambahan nilai penguat K untuk mengubah kecepatan motor dalam rpm ke rad/s diberikan sebagai umpan balik negative pada sistem. 6 buah mosfet digunakan sebagai penggerak dari motor BLDC. Subsistem Gate Driver yang berisi komutasi pensaklaran dapat dilihat pada Gambar 6.

Hasil step respon dapat dilihat pada Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa respon mencapai 450 rpm pada detik ke 0,3. Selanjutnya motor benar-benar berada pada setpoint 500 ketika mencapai detik ke 2,5. Hal ini menjadi salah satu kekurangan dari desain kendali Motor BLDC menggunakan PI. Selain itu, hasil yang ditunjukkan masih menunjukkan *ripple* meskipun tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan adanya faktor non linear dari pengontrolan motor BLDC.

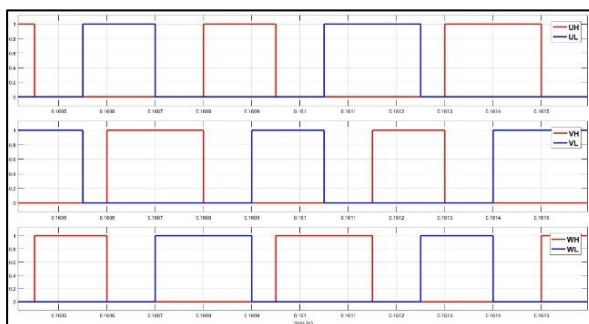


Gambar 7. Respon Step Sistem

Inverter terdiri dari beberapa saklar MOSFET berfungsi untuk mengubah sinyal DC menjadi sinyal trapezoidal tiga fasa dengan pola tertentu. Sinyal dari inverter ini akan diteruskan ke motor BLDC untuk mengontrol kumparan stator berdasarkan logika komutasi. Pembacaan hall sensor yang ditunjukkan pada Gambar 8 akan mempengaruhi hasil pensaklaran yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pensaklaran yang terjadi pada MOSFET sesuai dengan Tabel 1.



Gambar 8. Pembacaan Hall Sensor



Gambar 9. Switching State pada MOSFET

5. KESIMPULAN

Dengan memanfaatkan komutasi pada pensaklaran mosfet motor BLDC dapat berputar dengan baik. Hall sensor sebagai pendeteksi posisi rotor berperan penting dalam

menentukan pensaklaran mosfet. Kendali PI dapat diterapkan dalam pengontrolan motor BLDC. Hanya saja, faktor lineiritas menyebabkan respon yang diperoleh tidak maksimal dan menghasilkan *ripple*. Desain yang telah dibuat dalam penelitian ini berhasil menjalankan motor BLDC dan menunjukkan respon yang cukup baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Jannus, B. Nainggolan, and P. Marton, "Analisis Motor BLDC pada Sepeda Listrik." [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>
- [2] M. AKAR, M. EKER, and F. AKIN, "BLDC Motor Design and Application for Light Electric Vehicle," *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, Apr. 2021, doi: 10.35414/akufemubid.889877.
- [3] K. Saravana Kumar and R. Ganesan, "Analysis of Comparison and Selection of BLDC Motor for Electric Vehicles," *IJIRT 164676 INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY*, 1993.
- [4] M. A. A. Aziz *et al.*, "A Review on BLDC Motor Application in Electric Vehicle (EV) using Battery, Supercapacitor and Hybrid Energy Storage System: Efficiency and Future Prospects," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 30, no. 2, pp. 41–59, Apr. 2023, doi: 10.37934/araset.30.2.4159.
- [5] H. Li, W. Li, and H. Ren, "Fault-Tolerant Inverter for High-Speed Low-Inductance BLDC Drives in Aerospace Applications," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 3, pp. 2452–2463, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2569611.
- [6] E. J. Author, "PENGARUH FREKUENSI TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI PADA SISTEM PENGGERAK MEKANIS," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7654.
- [7] B. Akin and M. Bhardwaj, "Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors," 2013. [Online]. Available: www.ti.com
- [8] J. Wahyudi, G. A. Pauzi, and D. Warsito, "Desain dan Karakterisasi Penggunaan Sensor Efek Hall UGN3503 untuk Mengukur Arus Listrik pada Kumparan Leybold P6271 Secara Non Destruktif Diterima (2 Februari 2013), direvisi (20 Februari 2013)," 2013.

- [9] J. Teknik Elektro, "Analisis Efisiensi Kinerja Motor BLDC Menggunakan Metode Kontrol Sliding Mode Observer PI."
- [10] E. Cetin, "Brushless Direct Current Motor Design and Analysis," *COJ Electronics & Communications*, vol. 2, no. 2, Sep. 2021, doi: 10.31031/cojec.2021.02.000534.
- [11] Mrs Candida Y and M. T. Jenish, "Performance Analysis of BLDC Motors and its Various Control Strategies International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM) Performance Analysis of BLDC Motors and its Various Control Strategies," 2023, doi: 10.55041/IJSREM18002.
- [12] david toro, "Introduction to Brushless DC Motors," May 2021. [Online]. Available: www.diodes.com
- [13] M. Sharma, "CONTROL AND AUTOMATION OF BLDC MOTOR," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/342344817>
- [14] Katsuhiko. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice Hall, 2022.
- [15] Dale E Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, and Francis J. Doyle III, "Process Dynamics and Control," 2011.