

UJI PERFORMANSI PADA BATERAI MOTOR LISTRIK BLDC

Slamet Riyadi^{1*}, Gatot Setyono², Ong Andre Wahyu Rijanto³, Muchammad Muchid⁴,
Wahyu Nugroho⁵, Yudha Mahendra Prasetyo⁶, Sigit Budiarto⁷, Mahendra Putra Perdana⁸

^{1,2,4,5} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Wijaya Putra

^{3,6,7,8} Program Studi Teknik Industri, Universitas Wijaya Putra

*Email: slametriyadi@uwp.ac.id

ABSTRAK

Kendaraan listrik merupakan model transportasi yang dapat digunakan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Salah satu solusinya adalah dengan menggunakan energi listrik dalam transportasi, seperti mobil listrik, sepeda motor, dan kereta api. Sistem kelistrikan penting dalam kenyamanan dan keamanan pengendara yang mengendarai motor DC, baterai lithium, dan pengontrol sebagai komponen utama. Pada penelitian ini menggunakan aplikasi Brushless Direct Current (BLDC) sebagai penggerak sistem. Motor listrik ini diaplikasikan pada E-BIKE tipe BLDC dengan daya 1000 Watt dan 2000 watt, serta tegangan input 60 Hz dan kecepatan putaran 500 rpm dan 1000 rpm dengan baterai BMS sebesar 3.75V 25Ah dan 60 25Ah. Model sepeda motor listrik E-BIKE tipe BLDC ini dapat konversikan secara linier terhadap tromol dengan diameter roda 17 inci. Pada pengujian motor listrik BLDC 1000 Watt didapatkan hasil konsumsi energi dengan jarak tempuh 3 km sebesar 0,06 kWh seharga Rp. 81.12 -. Jarak 6 km menggunakan energi 0,13 kWh dengan harga Rp. 175,76 dengan jarak 8.2km. Pada pengujian motor listrik BLDC 2000 Watt dengan kecepatan 30-40 rpm dengan jarak 50 km, tipe tinggi dengan kecepatan 40-60 rpm dengan jarak 40-60 rpm dengan jarak 30 km, dan tipe turbo dengan kecepatan 60-80 rpm dengan jarak tempuh 20 km. Dalam pengujian sepeda motor listrik BLDC tanpa beban, yaitu pada kecepatan tetap, semakin besar penggunaan daya dan semakin sedikit waktu baterai dapat bertahan.

Kata Kunci: performansi; motor listrik; brushless direct current 3 phase.

PENDAHULUAN

Motor BLDC (Brushless Direct Current) adalah mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanis. Dewasa ini penggunaan motor BLDC telah banyak diterapkan pada berbagai bidang, seperti kendaraan listrik, industri, dan perumahan. Penggunaan motor BLDC karena karakteristiknya yang mudah dikendalikan, kecepatan tinggi, sedikit noise, dan daya tahan tinggi. Untuk mendukung kinerja motor BLDC, diperlukan beberapa pengamatan pada parameter motor antara lain rapat medan magnet, tegangan, tegangan balik EMF, arus, kecepatan rotor, torsi, dan efisiensi motor. Parameter motor BLDC dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor yang berasal dari lingkungan dan kondisi sekitarnya, sehingga mempengaruhi karakteristik motor [1][2]. Baru-baru ini, motor brushless direct-current (BLDC) telah menjadi sangat umum dan digunakan secara luas di berbagai area, peralatan rumah tangga, kendaraan listrik, perangkat dirgantara, perangkat medis, dan peralatan otomasi industri. Motor BLDC tidak memiliki sikat dan diubah secara elektronik [3][4].

Sistem penggerak mesin listrik terhubung paralel telah mendapat perhatian yang signifikan karena penggunaannya dalam aplikasi tujuan khusus. Baru-baru ini, kontrol sistem tersebut menggunakan inverter tunggal telah dipertimbangkan untuk meningkatkan stabilitas selama kondisi beban yang tidak merata pada mesin. Dalam makalah ini, strategi kontrol tersinkronisasi untuk operasi yang stabil dari motor arus searah tanpa sikat paralel ganda menggunakan inverter tiga fase tunggal diusulkan. Kontrol motor arus searah brushless terhubung paralel mengalami ketidakstabilan di bawah torsi beban yang berbeda. Untuk mendapatkan kestabilan tersebut, disajikan metode pengendalian yang efektif berdasarkan strategi master-slave. Untuk menganalisis stabilitas, model detail dari sistem yang diusulkan dikembangkan untuk sistem propulsi kendaraan listrik. Di dalamnya, motor dengan beban tertinggi atau dengan posisi rotor tertinggal dipilih sebagai master dan dikontrol secara langsung. Efektivitas sistem yang diusulkan ditunjukkan oleh serangkaian studi kasus dalam kondisi operasi yang berbeda [5][6].

Traksi kendaraan listrik Brushless Direct Current Motor (BLDCM) lebih baik dari mesin listrik lainnya karena hubungan fluks magnet, rasio daya terhadap berat dan sebagainya. Skema Field Orientation Control (FOC) konvensional dengan sensor untuk BLDCM memiliki beberapa kekurangan seperti penyimpangan karakteristik arus dan daya dorong. Dalam makalah ini, kami telah mengusulkan FOC kurang sensor untuk BLDCM. GGL balik dan kecepatan mesin diestimasi menggunakan pengontrol mode geser yang diberikan sebagai umpan balik ke bagian pengontrol motor. Hasilnya diamati dengan memvariasikan kecepatan referensi yang menghasilkan pengontrolan kecepatan mesin yang sesuai. Hasil diverifikasi dengan simulasi dan evaluasi eksperimental. Simulasi dilakukan melalui software MATLAB 2020a dan evaluasi eksperimental dilakukan melalui Altair Embed Emulator yang mengontrol BLDCM [7].

Model numerik yang menggambarkan perpindahan panas dan aliran udara di dalam dan di luar casing motor arus searah brushless magnet permanen (PM BLDC) disajikan. Dalam model, perpindahan panas konjugasi termasuk konduksi panas dengan sumber panas di belitan, magnet, bantalan, konveksi alami dan paksa dan fenomena radiasi dalam domain udara internal dan eksternal dianalisis. Model geometris kompleks termasuk gulungan, sirkuit magnet, rotor dengan magnet neodimium, pelat elektronik PCB, penutup plastik, udara internal antara bagian padat serta sebagian dari udara eksternal [8][9]. Motor arus searah (BLDC) tanpa sikat, yang tidak termasuk dalam motor klasik, tetapi saat ini, sebagian besar digunakan dalam sistem penggerak motor kecil daripada motor arus searah (DC). Bab ini dimulai dengan mengeksplorasi perbedaan antara motor BLDC dan motor DC. Perbandingan antara motor BLDC dan motor sinkron magnet permanen dari berbagai aspek konstruksi, metode mengemudi, dan kinerja juga diperiksa. Selanjutnya, dijelaskan struktur, prinsip operasi, dan metode penggerak dasar untuk motor BLDC tiga fasa. Pemodelan motor BLDC dan torsi riak selama pergantian diperiksa. Sistem kontrol kecepatan dan arus motor BLDC dieksplorasi. Skema switching bipolar dan unipolar sebagai teknik modulasi lebar pulsa diperkenalkan, dan beberapa skema switching unipolar juga dieksplorasi. Akhirnya,

skema kontrol sensorless motor BLDC dieksplorasi [10][11][12].

Penelitian ini menggunakan E-BIKE tipe BLDC dengan spesifikasi yaitu untuk 1000 Watt dan 2000 watt dengan frekuensi tegangan input 60Hz dan kecepatan putar 500 rpm dan 1000 rpm dengan baterai BMS 3,75V 25Ah dan 60V 25Ah. Model sepeda motor listrik BLDC tipe E-BIKE dapat disesuaikan dengan bentuk tromol sepeda motor dengan diameter roda 17 in. Kendaraan listrik merupakan benda yang dinamis dan menjadi kebutuhan dalam bidang transportasi. Untuk menghemat energi, motor BLDC yang digunakan pada kendaraan listrik harus bekerja secara maksimal. Oleh karena itu, perlu dipelajari pengaruh unjuk kerja motor BLDC. Sehingga pemanfaatan motor BLDC di berbagai medan dapat bekerja secara optimal dengan efisiensi yang tinggi.

METODE PENELITIAN

Motor Brushless Direct Current (BDC).

Brushless Direct Current Motor (BLDC motor) merupakan motor sinkron dengan magnet permanen yang menggunakan sumber daya Direct Current yang terintegrasi dengan power supply inverter dan sensor posisi untuk mengendalikannya [13][14][15]. Motor ini menggunakan arus tiga fasa, namun motor BLDC tidak termasuk dalam motor Arus Bolak-balik karena sumber arus motor BLDC dari sumber Arus searah tunggal yang diubah menjadi tegangan Arus Bolak-balik menggunakan inverter 3 fasa. Motor listrik bekerja berdasarkan prinsip medan elektromagnetik.

Konstruksi Brushless Direct Current (BDC).

Motor BLDC terdiri dari tiga bagian yaitu rotor, stator, dan poros. Rotor adalah bagian dari motor yang bergerak, stator adalah bagian motor yang diam, dan poros dikopel langsung ke rotor. Untuk menentukan waktu pergantian yang tepat dari motor ini sehingga diperoleh torsi dan kecepatan yang tetap, diperlukan 3 sensor hall dan/atau encoder [16][17][9].

Penelitian ini direncanakan untuk dilaksanakan dengan pencapaian pada tiap tahapan, 1. Identifikasi Menghitung RPM Motor Listrik (BLDC), 2. Identifikasi Torsi, Kecepatan dan Daya pada Motor Listrik (BLDC), 3. Identifikasi tegangan output sinyal PWM, 4. Tahap kecepatan laju kendaraan agar

kendaraan dapat melaju pada kecepatan yang di inginkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Nilai Input Motor DC

Data yang dikumpulkan dari motor yang digunakan terbatas dalam simulasi yang menggunakan fitur motor DC *brushless* permanen dari perpustakaan Simulink, perhitungan manual diperlukan untuk menentukan nilai input yang akan digunakan dalam simulasi eksperimental ini. Berdasarkan spesifikasi motor diperoleh nilai sebagai berikut:

Tabel 1. Data Spesifikasi Motor Listrik

Detail	Kapasitas	Unit
Inductance	0,51-10	Hour
Daya	1000	Watt
Frekuensi	60	Hz
Rotor speed	500	rpm
Arus motor	25	Ampere
Voltage	60	Volt

Karena nilai input dari data spesifikasi tidak mencukupi untuk simulasi, perhitungan dilakukan menggunakan metode empiris untuk menemukan nilai input yang diperlukan dan menyesuaikan dengan data berdasarkan spesifikasi motor.

Penentuan nilai torsi

Nilai keluaran pada motor DC dihitung secara numerik. Seperti yang kita ketahui, motor memiliki daya 800 watt dan kecepatan putaran 500 RPM, sehingga hal tersebut harus menyesuaikan putaran dengan kecepatan sudut. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ Revolution}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 500 \frac{\text{Revolution}}{\text{min}}$$

$$= 52,36 \text{ rad/s}$$

Maka Torsi yang dihasilkan :

$$P = T \times \omega$$

$$1000 = T \times 52,36 \text{ rad/s}$$

$$T = 19,098 \text{ Nm}$$

Berdasarkan analisa data diperoleh output torsi motor sebesar 19,098 Nm

Penentuan *pole pairs*

Setelah menentukan nilai torsi, tentukan nilai pasangan kutub. Pasangan kutub adalah pasangan kutub (poles) yang terdapat pada motor arus searah. Parameter pasangan kutub ditemukan di awal, tetapi penentuan akhir harus didasarkan pada nilai RPM. Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$\omega = \frac{120 \cdot Fz}{p}$$

$$500 = \frac{120 \cdot 60}{p}$$

$$p = 14.7$$

Menurut perhitungan di atas, nilai *pole* adalah 14,7. Alternatifnya, karena kutub terdiri dari 2 kutub, kutub positif dan kutub negatif, maka nilai kutub yang masuk ke parameter input untuk pasangan kutub adalah tujuh pasang, dibulatkan menjadi 14.

Tegangan Motor.

Tegangan merupakan kolaborasi perbandingan terbalik antara daya dengan arus yang digunakan, sehingga formulasinya bisa dijabarkan sebagai berikut.

$$P = V \times I = 800/15 = 53,3 \text{ Volt}$$

Resistansi pada kawat

Untuk menghitung resistansi, Anda memerlukan data panjang kabel (l), resistansi spesifik (Qcu), dan luas penampang kabel. Jika panjangnya dianggap 5 m dan resistivitas kawat tembaga ditentukan dari Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Resistansi untuk variasi material temperatur 200 C

Material Konduktor	Resistivitas ($\Omega \cdot m$)
argentum	1,59E-08
cupprum	1,68E-08
gold	2,44E-08
aluminium	2,65E-08
tungsten	5,60E-08
ferrum	9,71E-08
platinum	1,06E-08
mercury	9,80E-08
nikrom	1,00E-08
semi conductor	
carbon	6,00E-08
germanium	5,00E-08
silikon	0.1-60
isolator	
glass	10E8-10E12
rubber	10E12-10E15

Jika nilai hambatan kawat tembaga pada Tabel 3 adalah $1,68 \times 10^{-8}$ ohm m, maka nilai hambatan kawat tembaga dapat dihitung berdasarkan formulasi sebagai berikut.

$$R = \frac{Qcu i}{A}$$

$$R = \frac{8.06736 \times 10^{-8}}{7.85 \times 10^{-7}}$$

$$R = 0.103 \text{ ohm}$$

Input Data

Berikut perhitungan manual, data yang diterima sebagai bahan masukan untuk diagram blok yang dibuat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan data-input

Detail input	Kapasitas	Unit
Tegangan c	60	Volt
Tegangan motor	48	Volt
Frekuensi	60	Hz
kecepatan rotor	500	rad/s
Power	1000	Watt
Resistansi	0.103	Ohm
Mekanis Torsi	19,098	Nm
Kwantitas Pole	7	Pasang
Induktansi	0.51×10	Hour

Model yang digunakan adalah motor sinkron magnet permanen Simulink dengan bentuk gelombang BEMF trapesium. Setelah memasukkan data berdasarkan perhitungan, periode berikutnya menggunakan simulasi dengan batas diskrit kuat waktu simulasi 0,5 detik dan $T_s = 1e-006$.

Rolling Resistance

Rolling resistance (disingkat RR) mengacu pada semua gaya eksternal yang bekerja pada arah berlawanan dari kendaraan yang berjalan di lintasan. Untuk menghitung tahanan gelinding, gunakan rumus berikut:

$$F_r = W_t \times C_r = (176 \text{ kg}) \times (9,8 \text{ m/s}) \times (5\%) = 86,24 \text{ N}$$

Gaya Tahanan Aerodinamik

Resistansi yang dialami oleh sepeda motor listrik akibat gesekan dengan udara dikenal dengan istilah hambatan aerodinamis. Jumlah hambatan aerodinamis (F_a) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$C_d = (1.2m) \times (0.68m) = 0,816 \text{ m}^2$$

$$V = 30 \text{ km/j} = 8,33 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.202 \text{ kg/m}^3$$

Maka hasil perhitungan sebagai berikut :

$$F_a = 0,5 \times A \times C_d \times V^2 \times \rho = 37.43 \text{ N}$$

Hasil Uji Energi pada Jarak 3 Km

Pengambilan data menempuh jarak 3 km kemudian diisi hingga lampu pengisi daya berubah menjadi hijau. Dibutuhkan 40 menit untuk mengisi penuh baterai, yang ditunjukkan pada monitor 0,06 KWh. Jadi energi yang terjadi pada lintasan 3 km adalah 0,06 KWh. Harga listrik akan menjadi Rp. 1.352/KWh. Nilai output = $0,06 \text{ KWh} \times \text{Rp}1.352/\text{KWh} = \text{Rp} 81,12$

Hasil Uji Energi pada Jarak 6 Km

Pengambilan data menempuh jarak 6 km kemudian diisi hingga lampu pengisi daya berubah menjadi hijau. Dibutuhkan 1 jam 23 menit, menunjukkan bahwa baterai sudah penuh, dan indikator menunjukkan 0,13 KWh. Jadi energi yang terjadi pada lintasan 6 km adalah 0,13 KWh. Biaya listrik Rp. 1.352/KWh. Nilai output = $0,13 \text{ KWh} \times \text{Rp}1.352/\text{KWh} = \text{Rp} 175,76$

Hasil Uji Energi pada Jarak 8,2 Km

Pengambilan data menempuh jarak 8,2 km kemudian diisi hingga lampu pengisi daya berubah menjadi hijau. Dibutuhkan 1 jam 55 menit, menunjukkan bahwa baterai sudah penuh, dan indikator menunjukkan 0,20 KWh. Jadi energi yang terjadi pada lintasan 8,2 km adalah 0,20 KWh. Biaya listrik Rp. 1.352/KWh. Nilai output = $0,20 \text{ KWh} \times \text{Rp}1.352/\text{KWh} = \text{Rp} 270,4 -$

Tabel 4 menginformasikan uji dan pengukuran penggunaan energi pada bobot pengendara sebesar 68 kg.

Tabel 4. Suplai Energi Sepeda Motor Listrik BLDC 1000 Watt

Test	Jarak (km)	Time (min)	Output (kWh)
1	3	8	0,60
2	6	16	0,13
3	8,2	21	0,21

Pemakaian Energi Sepeda Motor Listrik BLDC 2000 Watt ditunjukkan Tabel 5 di bawah ini:

Tabel 5. Suplai Energi Sepeda Motor Listrik BLDC 2000 Watt

Test	Jarak (km)	Time (min)	Output (kWh)
1	3	8	0,15
2	6	16	0,25
3	8,2	21	0,50

Pengujian Sepeda Motor Listrik BLDC

Hasil uji BLDC tanpa beban didapatkan dengan mengubah variasi kecepatan tetapi menaikkan roda belakang agar tidak menyentuh lintasan sistem. Menurut data, sistem ini lebih hemat energi dan biaya, yang dapat dideskripsikan dalam bentuk persentase.

$$: \% \text{hemat energi dan biaya} = \frac{\text{harga pada c70}}{\text{harga pada BLDC 1 KW}} \times 100\%$$

Pada jarak tempuh 3 km didapat hasil :

$$\% \text{hemat energi dan biaya} = \frac{\text{Rp } 1.170}{\text{Rp } 81,12} \times 100\% = 1.442 \%$$

hasil uji pada jarak lintasan 3 km sepeda motor listrik BLDC didapatkan output bahwa 1kW bisa hemat biaya 14 kali dibanding dengan sepeda motor dibandingkan pada pemakaian C70

Pada jarak tempuh 6 km didapat hasil :

$$\% \text{hemat energi dan biaya} = \frac{\text{Rp } 2.340}{\text{Rp } 175,76} \times 100\% = 1.331 \%$$

hasil uji: jarak lintasan 6 km sepeda motor listrik BLDC didapatkan output bahwa 1 kW bisa menghemat biaya ± 13 kali dibandingkan pada pemakaian C70.

Pada jarak tempuh 8,2 km didapat hasil :

$$\% \text{hemat energi dan biaya} = \frac{\text{Rp } 3.196}{\text{Rp } 270,4} \times 100\% = 1.181 \%$$

hasil uji: jarak lintasan 8,2 km sepeda motor listrik BLDC didapatkan output bahwa 1 kW bisa menghemat biaya ± 11 kali dibandingkan pada pemakaian C70.

Pengujian dengan Variable Kondisi Jalan dan Berat Pengendara

Variabel kondisi jalan dan bobot pengemudi juga diuji dalam pengujian ini. Tabel 6 menunjukkan kondisi baterai penuh dan berjalan sampai baterai kosong.

Tabel 6. Hasil Uji Jalan dan Berat Pengendara Listrik BLDC 1000 Watt

Kondisi Jalan	Berat Pengendara (kg)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (min)
Bebas	65	15,2	45
Hambatan	85	12,8	33
Ada	65	13,5	58
Hambatan	85	10,8	50

Untuk uji Kondisi variabel Jalan dan Berat Pengendara 2000 Watt 1000 rpm dapat di lihat dengan Tabel 7 dibawah ini:

Tabel 7. Hasil Uji Jalan dan Berat Pengendara Listrik BLDC 2000 Watt

Kondisi Jalan	Berat Pengendara (kg)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (min)
Bebas	65	15,2	25
Hambatan	85	12,8	23
Ada	65	13,5	38
Hambatan	85	10,8	25

KESIMPULAN

Pemakaian Energi Sepeda Motor Listrik BLDC 1000 Watt dengan jarak tempuh: 3 km, 6 km 8,2 km, dan waktu tempuh: 8 menit, 16 menit, 21 menit adalah 0,6 KWh, 0,13 KWh, 0,21 KWh sedangkan, pemakaian Energi Sepeda Motor Listrik BLDC 2000 Watt: 0,15 KWh, 0,25 KWh 0,50 KWh

Hasil uji dengan Variabel Kondisi Jalan dengan Berat Pengendara Listrik BLDC 2000 Watt dengan jarak tempuh yang sama waktu tempuh yang di capai lebih cepat. Dengan Bebas Hambatan dengan parameter Berat Pengendara 65 kg, 85 kg, Jarak Tempuh: 15,2 km, 12,8 km Waktu Tempuh : 25 menit dan 23 menit dengan Ada Hambatan 38 menit dan 25 menit. Hasil uji Variabel Kondisi Jalan dengan Berat Pengendara Listrik BLDC 1000 Watt Dengan Bebas Hambatan 500 rpm 45 menit, 33 menit dengan Ada Hambatan 38 menit 25 menit

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Park, H. Kim, H. Jang, S. H. Ham, J. Lee, and D. H. Jung, "Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC with Halbach Magnet Array for Drone," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, Jun. 2020, doi: 10.1109/TASC.2020.2971672.
- [2] Slamet Riyadi, "Pengembangan Sistem Kelistrikan Motor Brushless Direct Current Speed Uwp V2.2 Kapasitas 2000 Watt," *Journal of System Engineering and Technological Innovation (JISTI)*, 2022. <http://jurnal.uwp.ac.id/ft/index.php/JISTI/article/view/10> (accessed Aug. 31, 2022).
- [3] J. Choi, J. H. Lee, Y. G. Jung, and H. Park, "Enhanced efficiency of the brushless direct current motor by introducing air flow for cooling," *Heat Mass Transf. 2020 566*, vol. 56, no. 6, pp. 1825–1831, Jan. 2020, doi: 10.1007/S00231-020-02827-8.
- [4] S. Kivrak, T. Özer, and Y. Oğuz, "Design and implementation of dspic33fj32mc204 microcontroller-based asynchronous motor voltage/frequency speed control circuit for the ventilation systems of vehicles:," <https://doi.org/10.1177/0020294019858097>, vol. 52, no. 7–8, pp. 1039–1047, Jul. 2019, doi: 10.1177/0020294019858097.
- [5] M. Ebadpour, M. B. B. Sharifian, and E. Babaei, "Modeling and synchronized control of dual parallel brushless direct current motors with single inverter," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 70, pp. 229–242, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.COMPELECENG.2017.08.016.
- [6] A. Ghosh, S. B. Santra, P. Biswal, and P. Chhotaray, "Bi-directional converter with modified multi-carrier PWM technique controlled brushless DC motor drive for compressor system," *Int. Conf. Commun. Signal Process. ICCSP 2016*, pp. 623–629, Nov. 2016, doi: 10.1109/ICCSP.2016.7754215.
- [7] P. Ramesh, A. Ranjeev, C. Santhakumar, J. Vinoth, and C. Bharatiraja, "Sensor-less field orientation control for brushless direct current motor controller for electric vehicles," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 277–284, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.06.168.
- [8] B. Melka, J. Smolka, J. Hetmanczyk, Z. Bulinski, D. Makiela, and A. Ryfa, "Experimentally validated numerical model of thermal and flow processes within the permanent magnet brushless direct current motor," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 130, pp. 406–415, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2018.04.029.
- [9] S. B. Utomo, J. F. Irawan, W. Hadi, and B. Sastiko, "Design of 6S8P axial flux permanent magnet brushless DC motor with double-sided rotor," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, no. 1, p. 012053, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1034/1/012053.
- [10] S.-H. Kim, "Brushless direct current motors," *Electr. Mot. Control*, pp. 389–416, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-812138-2.00010-6.
- [11] S. Ravichandran *et al.*, "A New Metaheuristic Optimization Algorithms for Brushless Direct Current Wheel Motor Design Problem," *Comput. Mater. Contin.*, 2021, doi: 10.32604/cmc.2021.015565.
- [12] H. Gruebler, S. Leitner, A. Muetze, and G. Schoener, "Improved Switching Strategy for a Single-Phase Brushless Direct Current Fan Drive and its Impact on Efficiency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 6050–6059, Nov. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2850017.
- [13] I. Anshory, I. Robandi, and Wirawan, "Monitoring and optimization of speed settings for Brushless Direct Current (BLDC) using Particle Swarm Optimization (PSO)," *Proc. - 2016 IEEE Reg. 10 Symp. TENSYP 2016*, pp. 243–248, Jul. 2016, doi: 10.1109/TENCONSPRING.2016.7519412.
- [14] C. M. Lee, H. S. Seol, J. Y. Lee, S. H. Lee, and D. W. Kang, "Optimization of Vibration and Noise Characteristics of Skewed Permanent Brushless Direct Current Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2711269.
- [15] Y. Karabacak and A. Uysal, "Fuzzy logic controlled brushless direct current motor drive design and application for regenerative braking," *IDAP 2017 - Int. Artif. Intell. Data Process. Symp.*, Oct. 2017, doi: 10.1109/IDAP.2017.8090282.
- [16] R. M. Pindoriya, A. K. Mishra, B. S. Rajpurohit, and R. Kumar, "An Analysis of Vibration and Acoustic Noise of BLDC

- Motor Drive,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-August, Dec. 2018, doi: 10.1109/PESGM.2018.8585750.
- [17] M. Skora, P. Ewert, and C. T. Kowalski, “Selected Rolling Bearing Fault Diagnostic Methods in Wheel Embedded Permanent Magnet Brushless Direct Current Motors,” *Energies 2019, Vol. 12, Page 4212*, vol. 12, no. 21, p. 4212, Nov. 2019, doi: 10.3390/EN12214212.