

Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan metode Mesin Sinkron dan Variasi PWM berbasis IoT

Asep Andang¹, Andri Uls Rahayu^{2*}, Imam Taufiqurrahman³, Ervan Paryono⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Siliwangi Tasikmalaya

^{1,2,3,4} Jln. Siliwangi No.24, Kota Tasikmalaya, 46115, Indonesia

E-mail: andhangs@unsil.ac.id¹, andriulusr@unsil.ac.id², imamtaufiqurrahman@unsil.ac.id³, paryonoervan@gmail.com⁴

Info Naskah:

Naskah masuk: 6 Agustus 2024

Direvisi: 29 November 2024

Diterima: 24 Desember 2024

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengendalian kecepatan motor *Brushless dc* (BLDC) menggunakan metode mesin sinkron dan variasi *Pulse Width Modulation* (PWM) berbasis *Internet of Things* (IoT). Motor BLDC dikendalikan oleh inverter tiga fasa yang diatur melalui mikrokontroler STM32. Pengendalian kecepatan dilakukan dengan menyesuaikan frekuensi inverter berdasarkan prinsip kerja mesin sinkron, sementara siklus kerja PWM divariasikan untuk mengatur tegangan masukan. Sistem berbasis IoT yang terhubung dengan aplikasi ponsel pintar memungkinkan pengaturan kecepatan secara jarak jauh. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode mesin sinkron dapat mengontrol kecepatan motor BLDC secara efektif, dengan perubahan frekuensi yang secara linear memengaruhi tegangan keluaran inverter. Variasi siklus kerja PWM mempengaruhi tegangan yang diperlukan untuk mencapai kecepatan target, di mana siklus kerja lebih tinggi membutuhkan tegangan yang lebih rendah. Sistem kontrol ini mampu mencapai akurasi kecepatan dalam batas $\pm 3\%$ dari setpoint pada berbagai siklus kerja. Pendekatan ini menunjukkan potensi penerapan prinsip mesin sinkron untuk pengendalian motor BLDC dengan integrasi IoT

Keywords:

speed control;

synchronous machine method;

brushless DC;

pulse width modulation.

Abstract

This study investigates speed control of brushless DC (BLDC) motors using a synchronous machine method and *Pulse Width Modulation* (PWM) variations based on IoT. A three-phase inverter controlled by an STM32 microcontroller was used to drive the BLDC motor. Speed control was implemented by adjusting the inverter frequency based on the synchronous machine principle, while PWM duty cycle was varied to regulate the input voltage. An IoT-based system using a smartphone app allowed remote speed settings. Experimental results showed that the synchronous machine method could effectively control BLDC motor speed, with frequency changes linearly affecting inverter output voltage. Varying PWM duty cycles impacted the voltage required to achieve target speeds, with higher duty cycles requiring lower voltages. The control system achieved speed accuracies within 3% of setpoints across different duty cycles. This approach demonstrates the feasibility of applying synchronous machine principles for BLDC motor control with IoT integration.

*Penulis korespondensi:

Andri Uls Rahayu

E-mail: andriulusr@unsil.ac.id

1. Pendahuluan

Motor BLDC merupakan motor yang saat ini menjadi trend dan menjadi pilihan utama dalam proses mekanika. Motor ini menjadi pilihan karena berbagai kelebihan, diantaranya motor BLDC ini mempunyai struktur ringan, respon waktu lebih cepat, umur pakai lebih lama, dan mempunyai rentang kecepatan yang lebar[1][2], disamping itu motor BLDC ini mempunyai efisiensi tinggi dan kebisingan yang rendah karena putarannya halus[3] serta torsi yang besar[4]. Motor BLDC ini juga mempunyai kelebihan mampu ditempatkan pada area berbahaya karena tidak adanya komutator sehingga tidak menimbulkan percikan api antara komutator dan sikat karbon[5][6].

Berbagai pengendalian telah dikembangkan untuk mengatur kecepatan motor BLDC ini diantaranya *Proportional Integral Derivative* PID[7]–[9] yaitu persamaan sistem motor BLDC diterapkan konstanta PID untuk mengatur respon kecepatan terhadap waktu dan kestabilannya, pengaturan lain dilakukan dengan turunannya seperti Fuzzy seperti Fuzzy PID[10], [11], hal ini dilakukan untuk memperbaiki *error* akibat PID dengan membagi kecepatan menjadi beberapa bagian keanggotaan masukan. Adaptive Fuzzy PID[12],[13] dilakukan proses perbaikan error menggunakan proses loop tertutup dengan memperhatikan masukan feedback kecepatan dan *Artificial Intelligent* AI-PID[1] yaitu melakukan proses tuning PID dengan menggunakan AI. Meski demikian pengendalian dengan PWM masih menjadi pilihan karena kemudahan dan kesederhanaannya masih mampu mengendalikan motor BLDC[14], [15].

Pengendalian kecepatan motor BPDC dengan kendali PWM membutuhkan hanya sinyal PWM dengan *duty cycle* yang dapat diatur secara langsung, pembangkitan PWM ini bisa dilakukan secara konvensional maupun digital[16]–[18]. Pengendalian kecepatan motor BLDC dilakukan dengan pendekatan lain yaitu dengan menganggap Motor BLDC sebagai *Permanent magnet Synchronous Motor* (PMSM). Hal ini dikarenakan kesamaan konstruksi menggunakan magnet permanen, kemudian belitan jangkar menggunakan tegangan ac berupa catu daya tiga fasa [19][20].

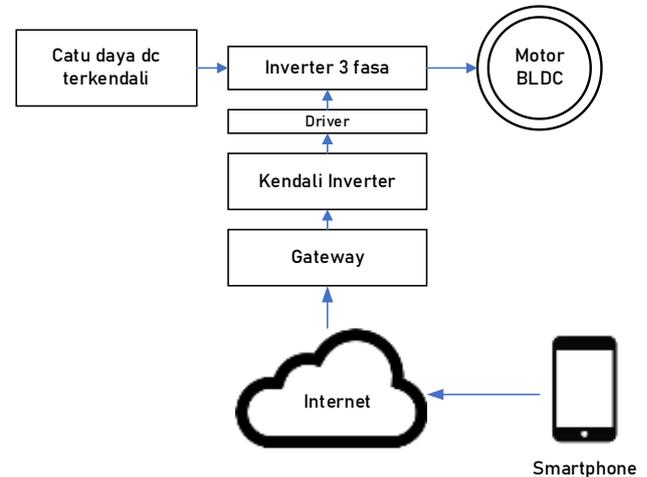
Pada penelitian ini dilakukan pembangunan sistem pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa tiga kawat dengan pengaturan frekuensi catu daya tegangan dengan menganalogikan motor BLDC sama dengan motor sinkron, sehingga pengendalian yang dilakukan menjadi lebih sederhana. Penelitian ini juga akan meneliti pengaruh frekuensi pensaklaran tegangan masukan PWM dengan menggunakan varian nilai *duty cycle* terhadap kecepatan motor BLDC, sehingga didapatkan optimasi pengendalian kecepatan motor BLDC berdasarkan variabel frekuensi dan PWM.

Adapun sistematika artikel ini terdiri dari bagian metode yang menerangkan metode pembangunan sistem kendali kecepatan motor BLDC, sistem pengendalian kecepatan berbasis IoT, konversi kecepatan ke frekuensi, pengaruh frekuensi terhadap tegangan catu daya, pengaruh *duty cycle* PWM terhadap kecepatan, pengaturan pembangkitan saklar PWM, pengaturan *duty cycle* dan pengaturan frekuensi pensaklaran, kemudian bagian hasil

dan pembahasan berisi hasil pengujian serta analisa pengaruh frekuensi pada PWM terhadap kecepatan motor BLDC dan konklusi berisi kesimpulan serta penelitian yang akan dikembangkan.

2. Metode

Blok diagram pengendalian kecepatan motor BLDC dengan menggunakan IoT dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram pengendalian kecepatan motor BLDC

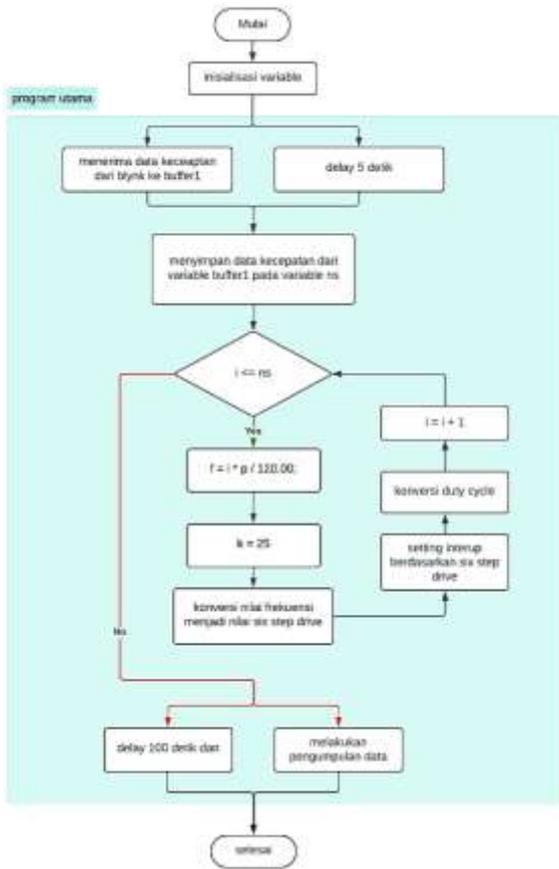
Inverter dicatu dengan menggunakan sumber dc terkendali sehingga parameter tegangan masuk dan arus masuk dapat dikendalikan untuk melakukan pengujian dengan parameter yang sama. Sumber daya dc ini masuk ke inverter tiga fasa yang akan mengubah tegangan dc menjadi tegangan ac, dengan menggunakan STM32 sebagai kendali inverter. Kendali inverter ini mendapat masukan berupa kecepatan motor melalui smartphone yang terhubung dengan *gateway* melalui internet. Masukan kecepatan ini akan diubah oleh kendali inverter berupa kondisi pensaklaran yang kemudian diteruskan menuju *driver* inverter. Inverter akan mengubah tegangan sehingga kecepatan motor BLDC akan sesuai dengan kecepatan yang diinputkan pada smartphone.

Prinsip pengendalian dengan metode mesin sinkron mengacu bahwa kecepatan putaran motor BLDC akan dipengaruhi oleh frekuensi kerja inverter serta banyak kutub magnet dari motor BLDC hal ini dapat dinyatakan dalam persamaan (1)

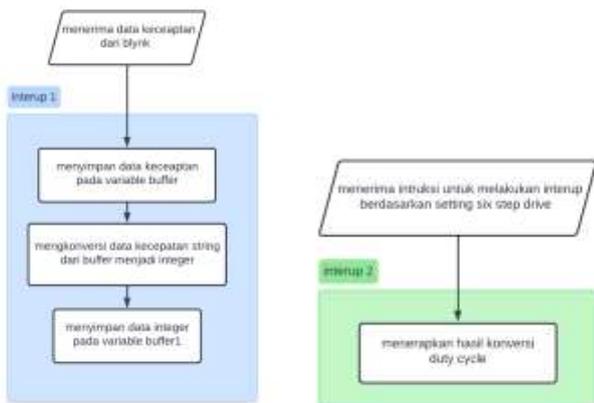
$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

Dengan n adalah kecepatan putaran motor dalam satuan rpm kemudian f adalah frekuensi inverter dalam Hz dan p adalah jumlah kutub magnet dari motor BLDC.

Adapun *flowchart* dari program pengendalian motor BLDC dapat dilihat dari gambar 2(a) untuk program utama dan gambar 2(b) untuk interrupt



(a)



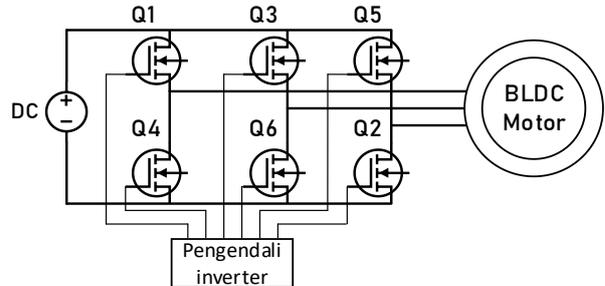
(b)

Gambar 2. Flowchart Sistem (a) program utama (b) program interrupt

Program diawali dengan adanya penerimaan data dari smartphone lewat internet. Data ini kemudian disimpan dalam buffer1 dan dibuat delay selama 5 detik. Variabel ns akan menerima data dari variabel buffer1. ns ini merupakan pengaturan kecepatan motor. Fungsi $i \leq ns$ digunakan untuk memulai loop for yang akan dijalankan berulang-ulang selama nilai i berada di antara 100 dan ns. Perulangan akan terus berjalan selama i lebih kecil atau sama dengan ns. Fungsi dari $i++$: adalah setelah setiap iterasi loop, nilai i akan ditambah 1. Hal ini digunakan agar motor dapat menaikkan kecepatannya sedikit demi sedikit, jika tidak maka rotor motor tidak akan berputar (slip = 1)

Fungsi $f = i * p / 120.00$; digunakan untuk melakukan perhitungan untuk menghasilkan nilai frekuensi, dengan f adalah frekuensi dan p adalah jumlah kutub. Program interrupt 1 berfungsi untuk melakukan update kecepatan yang berasal dari handphone sedangkan interrupt 2 berfungsi untuk melakukan update duty cycle PWM.

Dengan menggunakan motor BLDC tiga fasa terhubung Y maka setiap siklus yang terhubung hanya 2 belitan. Dengan rangkaian inverter seperti pada gambar 3.



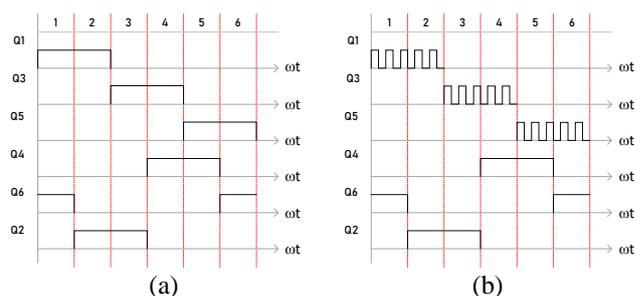
Gambar 3 inverter pengendali motor BLDC

Terdapat 6 buah MOSFET pada inverter pengendali motor BLDC yaitu Q1 berpasangan dengan Q4, Q3 berpasangan dengan Q6 dan Q5 berpasangan dengan Q2. Setiap MOSFET akan terkonduksi masing-masing selama 120 derajat dengan pola pengsaklaran inverter akan seperti pada tabel 1

Tabel 1. Pola Pengsaklaran Mosfet

Step	MOSFET					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	1	0	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	0	0	0	1	1	0
6	0	0	0	0	1	1

Frekuensi pengsaklaran berpengaruh pada satu siklus yang terdiri dari enam langkah kendali motor BLDC, tetapi masing-masing MOSFET tetap terkonduksi 120° . Pengaturan duty cycle PWM dilakukan dengan mengatur penyalan MOSFET Q1, Q3 dan Q5. sedangkan untuk Q4, Q6 dan Q2 dibiarkan. Adapun bentuk gelombang PWM untuk duty cycle 100% dapat dilihat pada gambar 4(a) sedangkan contoh PWM 50% pada gambar 4(b)



Gambar 4. PWM Pengendali Inverter (a) 100% (b) 50%

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian metode dilakukan dengan menggunakan kendali STM32 Nucleo yang terhubung dengan driver IR2101. Sedangkan untuk MOSFET nya menggunakan IRF 450N, dengan menggunakan motor BLDC A2212 1000KV dengan jumlah kutub 14, tegangan maksimum 12,6 V dan arus maksimum 13A. Untuk menghubungkan rangkaian dengan Internet digunakan gateway berupa ESP01 yang terhubung dengan STM32. ESP01 ini menjadi jembatan antara kendali dengan internet. Pengendalian secara jarak jauh menggunakan Blynk yang terinstal di smartphone. Adapun rangkaian yang dibangun seperti pada gambar 5.



(a)

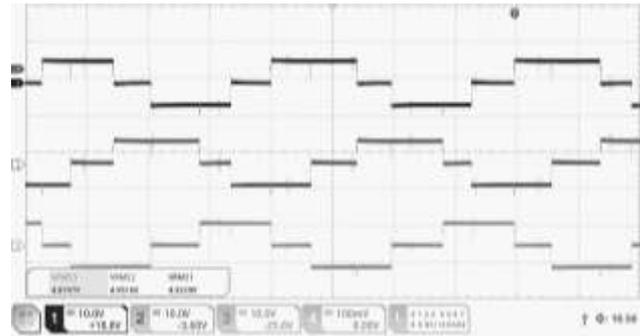


(b)

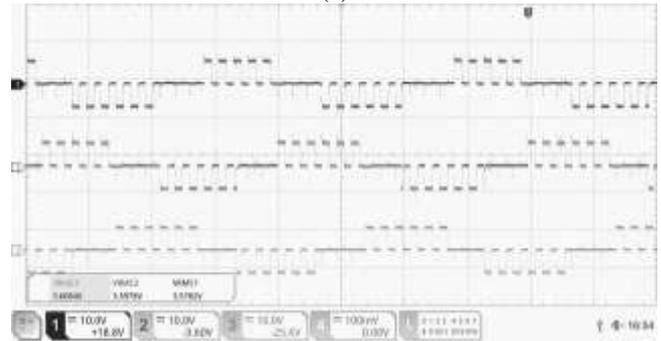
Gambar 5. Model pengujian (a) Rangkaian Pengujian (b) tampilan Blynk pada smartphone

3.1 Pengujian Beban Resistor

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui proses pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan terminal dan melihat bentuk gelombang PWM. Hal ini dilakukan sebelum terhubung dengan motor BLDC yang mempunyai impedansi sehingga bisa mengganggu tampilan bentuk gelombang. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan inverter dengan Tahanan 15 ohm 20 watt yang terhubung secara Y



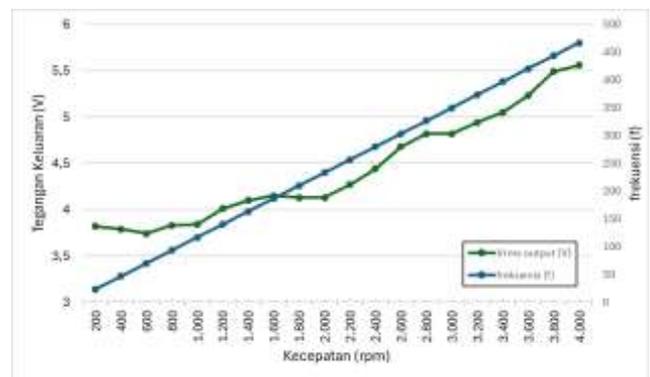
(a)



(b)

Gambar 6. Pengujian PWM dengan variasi dutycycle (a) 100% (b) 50%

Dari gambar 6 terlihat perbedaan bentuk gelombang tegangan keluaran untuk *dutycycle* yang berbeda. Nilai tegangan keluaran rms akan dipengaruhi oleh besarnya nilai *dutycycle* dan akan mempunyai nilai maksimal ketika *dutycycle* berharga 100%.



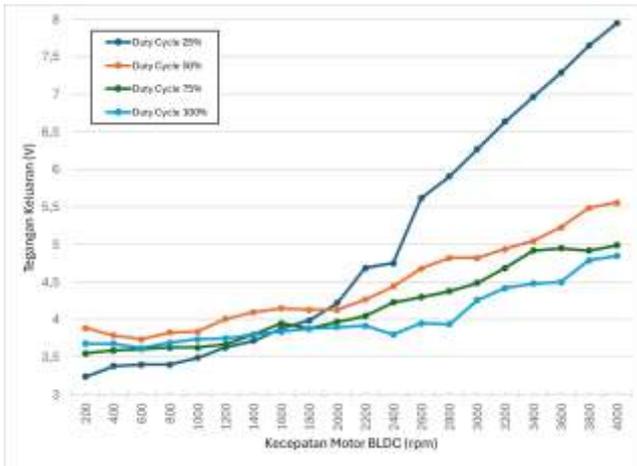
Gambar 7. Pengaruh perubahan kecepatan terhadap frekuensi dan tegangan keluaran

Pengujian dengan beban resistor pada gambar 7, memperlihatkan kesesuaian dengan persamaan (1) bahwa perubahan kecepatan motor yang dimasukkan pada handphone mempunyai pengaruh terhadap tegangan keluaran pada inverter, pengaturan kecepatan ini sesuai dengan *flowchart* gambar 2. Laju perubahan nilai frekuensi pengsaklaran inverter berpengaruh secara linier terhadap tegangan inverter.

3.2 Pengujian dengan menggunakan Motor BLDC

Pengujian dengan menggunakan motor BLDC dilakukan dengan memberikan variasi nilai *dutycycle* PWM

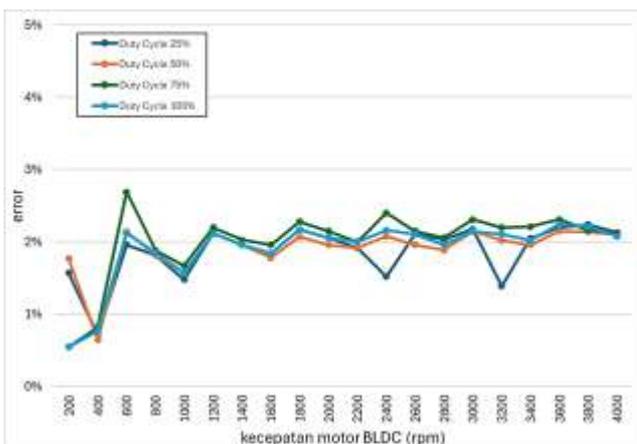
secara berurutan mulai dari 25%, 50%, 75% sampai dengan 100%. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai *duty cycle* terhadap kecepatan motor BLDC.



Gambar 8. Pengaruh duty cycle terhadap pengaturan kecepatan motor BLDC

Gambar 8 dapat dilihat bahwa untuk menghasilkan kecepatan motor tinggi maka tegangan yang dibutuhkan bervariasi. Tegangan yang diukur adalah tegangan rms yang merupakan integrasi panjangnya gelombang tegangan yang terukur. Dapat dilihat bahwa semakin rendah *duty cycle* semakin tinggi tegangan yang dibutuhkan untuk mencapai rpm yang sama. Sehingga bila *duty cycle* 100% maka tegangan mempunyai nilai paling rendah dibandingkan dengan nilai *duty cycle* yang lain.

Akurasi nilai kecepatan motor antara nilai yang diinput dengan menggunakan aplikasi Blynk di smartphone dengan kecepatan putaran motor BLDC dapat diketahui dengan pengukuran secara langsung. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengaruh duty cycle terhadap pengaturan kecepatan motor BLDC

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa *error* set point kecepatan pada blynk di smartphone dan nilai kecepatan motor BLDC terukur mempunyai *error* yang kecil dibawah 3%. Dan gambar 9 juga dapat dilihat bahwa nilai *duty cycle* tidak mempunyai pengaruh signifikan terhadap akurasi nilai

kecepatan putaran motor pada set point pada Blynk smartphone dan yang terukur.

Penelitian ini memperlihatkan pengendalian kecepatan motor BLDC dapat dilakukan dengan memperlakukan motor BLDC sebagai motor sinkron. Pengendalian motor BLDC dapat dilakukan dengan mengatur besar frekuensi tegangan terminal motor BLDC dan mengakibatkan perubahan kecepatan. Gabungan pengaturan frekuensi dan PWM memperlihatkan adanya dampak berkebalikan antara *duty cycle* dan kecepatan motor BLDC.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa pengaturan kecepatan motor menggunakan metode mesin sinkron dapat dilakukan pada motor BDC. Pengaturan kecepatan motor BLDC dengan metode mesin sinkron ternyata menurunkan tegangan keluaran sehingga kecepatan motor BLDC dapat diregulasi. Pengaturan *duty cycle* pada inverter mempengaruhi tegangan masukan motor BLDC. Semakin tinggi *duty cycle* semakin tinggi pula tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan kecepatan yang sama. *Duty cycle* tidak mempengaruhi akurasi pengendalian kecepatan putaran motor BLDC dengan metode mesin sinkron. dapat dilihat pula *error* yang terjadi tidak signifikan karena berada pada 0,5% s.d. 2,9%.

Penelitian selanjutnya akan dikembangkan pengendalian motor BLDC metode motor sinkron dengan sistem closed loop dengan memperhatikan *feedback* luaran baik berupa kecepatan tetap atau torka yang di jaga tetap. Juga akan diteliti pengaruh pembebanan terhadap kestabilan kecepatan motor BLDC dengan varian PWM serta kombinasi frekuensi tegangan terminal motor BLDC.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada LPPMP Universitas Siliwangi yang telah membiayai penelitian ini dengan skema PPKom pada tahun anggaran 2023.

Daftar Pustaka

- [1] D. Irawan and P. Perdana SS, "Kontrol Motor Brushless DC (BLDC) Berbasis Algoritma AI - PID," *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 2, no. 1, pp. 41–48, Mar. 2020, doi: 10.32528/elkom.v2i1.3146.
- [2] F. Rohman, M. A. Nur Huda, M. D. Ardiansyah, and F. Rohman, "Implementasi Dan Analisis Kendali Kecepatan Pada Motor Bldc 1 Kw Tanpa Beban Menggunakan Algoritma Pid," *J. Eltek*, vol. 17, no. 2, p. 94, Nov. 2019, doi: 10.33795/eltek.v17i2.160.
- [3] D. Akbar and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation)," in *Seminar Nasional Kontrol, Instrumentasi dan Otomasi (SNIKO) 2018, 2019*, pp. 255–262. doi: 10.5614/sniko.2018.30.
- [4] I. Sholikha, S. D. Nugraha, O. A. Qudsi, E. Purwanto, G. Prabowo, and I. Ferdiansyah, "Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Sensorless Menggunakan FOC," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 11, no. 2, p. 162, Jul. 2022, doi: 10.30591/polekro.v12i1.2960.
- [5] 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, p. 822, Jun. 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.pp822-830.
- [6] M. R. Haque and S. Khan, "The Modified Proportional

- Integral Controller for the BLDC Motor and Electric Vehicle,” in *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Apr. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422548.
- [7] R. F. Anugrah, “Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation Dengan Kontrol PID (Propotional Integral Derivative),” *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 7, no. 2, pp. 57–63, Dec. 2020, doi: 10.21107/triac.v7i2.7923.
- [8] B. P. Putri, S. Sutedjo, O. A. Qudsi, and L. S. Mahendra, “Alat Penstabil Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Kontrol PID,” *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 134–140, Aug. 2022, doi: 10.23917/emit.v22i2.19384.
- [9] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Z. Alam, and Anis Nurashikin Nordin, “Control BLDC Motor Speed using PID Controller,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 477–481, 2020, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110359.
- [10] Agung Dwi Yulianta, S. P. Hadi, and Suharyanto, “Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan Metode Logika FUZZY,” *Tekno. TECHNOSCIENTIA*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2015, doi: <https://doi.org/10.34151/technoscience.v8i1.180>.
- [11] J. Jing, Y. Wang, and Y. Huang, “The fuzzy-PID control of brushless DC motor,” in *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Aug. 2016, no. 2, pp. 1440–1444. doi: 10.1109/ICMA.2016.7558775.
- [12] H. Yin, W. Yi, K. Wang, J. Guan, and J. Wu, “Research on brushless DC motor control system based on fuzzy parameter adaptive PI algorithm,” *AIP Adv.*, vol. 10, no. 10, p. 105208, Oct. 2020, doi: 10.1063/5.0025000.
- [13] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, and A. N. Nordin, “Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor,” in *2020 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, Jul. 2020, pp. 168–171. doi: 10.1109/ICSE49846.2020.9166883.
- [14] P. Astuti and H. Masdi, “Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 1, pp. 120–135, Jan. 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.216.
- [15] M. P. Ciurys, “Analysis of the influence of inverter PWM speed control methods on the operation of a BLDC motor,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 67, no. 4, pp. 939–953, Jul. 2023, doi: 10.24425/ae.2018.124834.
- [16] A. Azarudeen and D. Mary, “Performance analysis of conventional and digital PWM control scheme for speed control of BLDC motor drives,” in *2017 International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT)*, Sep. 2017, vol. 2018-Janua, pp. 69–75. doi: 10.1109/ICAETGT.2017.8341460.
- [17] P. Mishra, A. Banerjee, and M. Ghosh, “FPGA-Based Real-Time Implementation of Quadral-Duty Digital-PWM-Controlled Permanent Magnet BLDC Drive,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1456–1467, Jun. 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.2977859.
- [18] R. M. Pindoriya, A. K. Mishra, B. S. Rajpurohit, and R. Kumar, “FPGA Based Digital Control Technique for BLDC Motor Drive,” in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Aug. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2018.8586472.
- [19] J. Zhao and Y. Yangwei, “Brushless DC Motor Fundamentals Application Note,” 2014.
- [20] S.-H. Kim, *Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors*, no. 0. Elsevier, 2016.