

Perancangan dan Simulasi Kendali Motor BLDC Menggunakan Atmega2560 Berbasis Sensor Hall di Proteus

Ilham Mudin¹, Rama Dhayanti², dan Rehulina Sembiring³

^{1,2,3} Universitas Negeri Medan

Jll. Willem Iskandar / Pasar V, Medan, Sumatera Utara – Indonesia Kotak Pos 1589, Kode Pos 20221

ilhammudin675@gmail.com¹, ramadhayanti960@gmail.com², rehulinasm@gmail.com³

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem kendali motor Brushless DC (BLDC) menggunakan mikrokontroler Atmega2560 yang berbasis sensor Hall untuk mendekripsi posisi rotor motor. Mikrokontroler ini menghasilkan sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan inverter tiga fase yang mengatur aliran daya ke motor. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Proteus untuk memvisualisasikan sinyal PWM dan menguji logika kendali motor sebelum implementasi fisik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ini dapat mengatur tegangan dengan presisi pada setiap fase motor BLDC, memastikan kestabilan dan efisiensi motor pada beban ringan hingga sedang. Namun, pada kondisi beban berat, sistem menunjukkan penurunan kinerja yang mengindikasikan perlunya pengembangan lebih lanjut pada sistem kendali untuk menangani beban lebih besar. Penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut sistem kendali motor BLDC dengan algoritma kontrol berbasis PID atau FOC (Field Oriented Control), yang dapat meningkatkan efisiensi dan performa motor untuk aplikasi di sektor otomotif dan robotika.

Kata kunci— Motor BLDC, Mikrokontroler Atmega2560, Sensor Hall, Sinyal PWM, Inverter Tiga Fase, Proteus, Kontrol Motor.

Abstract—This study aims to design and simulate a Brushless DC (BLDC) motor control system using the Atmega2560 microcontroller, based on Hall sensor technology for rotor position detection. The microcontroller generates PWM signals used to control the three-phase inverter that supplies power to the motor. The simulation was conducted using Proteus software to visualize the PWM signals and test the motor control logic before physical implementation. The simulation results show that the system effectively regulates the voltage across each motor phase, ensuring stable and efficient motor performance under light to moderate loads. However, under heavy load conditions, the system exhibits a reduction in performance, indicating the need for further development in the control system to handle higher loads. This study opens the opportunity for further development of BLDC motor control systems using PID or Field Oriented Control (FOC) algorithms, which can enhance the efficiency and performance of the motor for applications in the automotive and robotics sectors.

Keywords—BLDC Motor, Atmega2560 Microcontroller, Hall Sensor, PWM Signals, Three-Phase Inverter, Proteus, Motor Control

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi motor listrik semakin pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem penggerak yang efisien, andal, dan ramah lingkungan. Salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi modern adalah *Brushless DC Motor* (BLDC). Motor BLDC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, seperti efisiensi tinggi, torsi yang lebih stabil, perawatan rendah, serta daya tahan yang lebih lama karena tidak adanya komutator mekanis.

Penggunaan motor BLDC semakin meluas, terutama dalam bidang otomotif (kendaraan listrik), robotika, industri otomasi, dan peralatan rumah tangga pintar. Namun, pengendalian motor BLDC memerlukan sistem kendali elektronik yang kompleks, karena posisi rotor harus diketahui secara tepat untuk menentukan urutan penyalaan kumparan stator. Oleh karena itu, dibutuhkan sensor posisi seperti sensor *Hall Effect*, serta mikrokontroler yang mampu menghasilkan sinyal PWM

(Pulse Width Modulation) secara akurat untuk mengendalikan inverter tiga fasa.

Penelitian ini, dilakukan perancangan dan simulasi sistem kendali motor BLDC berbasis mikrokontroler Atmega2560, yang membaca sinyal dari sensor Hall dan menghasilkan sinyal PWM untuk mengendalikan motor. Proses simulasi dilakukan menggunakan Perangkat Lunak Proteus, yang memungkinkan visualisasi sinyal serta pengujian logika kendali sebelum implementasi secara fisik.

Pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik tentang prinsip kerja motor BLDC dan sistem pengendaliannya, serta mempermudah proses pengembangan sistem motor BLDC untuk berbagai aplikasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk menjadi dasar pengembangan lebih lanjut ke arah sistem kendali yang lebih kompleks, seperti penggunaan kontrol berbasis PID atau FOC (Field Oriented Control).

II. DASAR TEORI

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan salah satu jenis motor listrik arus searah yang dikendalikan secara elektronik, tanpa menggunakan sikat (brush). Sistem kontrol motor BLDC tidak lagi menggunakan komutasi mekanik, melainkan mengandalkan sistem komutasi elektronik yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Komutasi ini didasarkan pada informasi posisi rotor yang biasanya diperoleh dari sensor Hall.

Menurut Fabelo et al. (2014), motor BLDC bekerja berdasarkan sinyal komutasi elektronik yang diperoleh dari sensor posisi, bukan menggunakan sikat seperti motor DC konvensional. Sensor Hall digunakan untuk menunjukkan posisi rotor kepada mikrokontroler, yang kemudian mengaktifkan kumparan motor dengan urutan switching yang tepat untuk menghasilkan gerakan (Fabelo, Cabrera, Vega, & Déniz, 2014).

Pengendalian motor BLDC dilakukan melalui proses komutasi enam langkah (six-step commutation), di mana dua dari tiga kumparan motor diberi arus, sementara satu kumparan dibiarkan dalam kondisi mengambang. Metode ini dikenal dengan istilah komutasi trapezoidal atau blok. Seperti dijelaskan oleh Microchip Technology (2008), “komutasi ini disebut sebagai trapezoidal commutation atau block commutation, di mana hanya dua belitan aktif dalam satu waktu, dan satu lainnya mengambang”.

Pengembangan sistem kendali motor BLDC, platform Arduino sering digunakan karena sifatnya yang terbuka, murah, serta mudah diakses. Mach et al. (2018) menyebutkan bahwa Arduino merupakan pilihan populer karena kesederhanaannya, ketersediaannya di pasaran, dan efektivitas biaya. Sistem ini cocok digunakan untuk aplikasi seperti kendaraan udara tanpa awak (UAV), serta eksperimen akademik lainnya.

Pada sistem kontrol modern, pendekatan berbasis kecerdasan buatan mulai dikembangkan untuk menggantikan metode konvensional yang bergantung pada sensor posisi. Yao et al. (2023) mengemukakan bahwa kontrol berbasis jaringan syaraf tiruan (artificial neural network/ANN) mampu meningkatkan estimasi posisi rotor secara sensorless, sekaligus mengurangi kompleksitas sistem dan meningkatkan keandalan sistem kontrol motor.

A. Pulse Width Modulation

Teknik Pulse Width Modulation (PWM) adalah metode pengendalian tegangan rata-rata yang diterapkan pada beban listrik dengan cara memodulasi lebar pulsa sinyal digital. Dalam konteks pengendalian motor BLDC, PWM digunakan untuk mengatur kecepatan motor dengan mengendalikan tegangan efektif yang diterapkan ke kumparan motor.

PWM bekerja dengan menghasilkan pulsa-pulsa digital yang memiliki frekuensi tetap, tetapi lebar pulsa (duty cycle) yang bervariasi. Semakin besar duty cycle, maka semakin besar pula tegangan rata-rata yang diberikan ke motor, sehingga kecepatan motor akan meningkat. Sebaliknya, jika duty cycle dikurangi, maka tegangan rata-rata menurun dan kecepatan motor berkurang (Microchip Technology, 2008).

Menurut Mach et al. (2018), dalam pengendalian motor BLDC berbasis Arduino, sinyal PWM sangat penting untuk mengatur daya yang masuk ke motor melalui driver ESC (Electronic Speed Controller). ESC akan mengubah sinyal PWM menjadi sinyal tiga fasa untuk menjalankan motor BLDC dengan komutasi yang sesuai. Teknik ini tidak hanya memungkinkan kontrol kecepatan, tetapi juga membantu meningkatkan efisiensi sistem dan memperpanjang umur motor.

Mikrokontroler seperti ATmega2560, modul PWM disediakan melalui Timer/Counter internal yang dapat menghasilkan sinyal PWM dengan presisi tinggi. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan hingga 12 kanal PWM yang dapat diprogram untuk berbagai keperluan kendali motor dan aktuator lainnya (Microchip Technology, 2014).

PWM juga memainkan peran penting dalam mengurangi konsumsi daya dan meningkatkan performa keseluruhan sistem, terutama ketika digunakan bersama teknik sensorless dan algoritma kendali berbasis kecerdasan buatan. Yao et al. (2023) menambahkan bahwa sinyal tegangan fasa yang dikendalikan melalui PWM digunakan sebagai input dalam jaringan neural MLP untuk estimasi posisi rotor yang presisi dalam sistem kontrol motor BLDC sensorless.

B. Sensor Hall

Sensor Hall merupakan salah satu komponen utama dalam sistem pengendalian motor BLDC (Brushless Direct Current) yang berfungsi sebagai sensor posisi rotor. Sensor ini bekerja berdasarkan efek Hall, yaitu fenomena terbentuknya tegangan transversal ketika arus listrik mengalir dalam medan magnet. Dalam konteks motor BLDC, tiga buah sensor Hall biasanya dipasang secara terpisah pada sudut 120° listrik untuk mendeteksi posisi rotor secara tepat.

Menurut dokumen aplikasi dari Microchip, sensor Hall menghasilkan enam kombinasi sinyal logika selama satu siklus putaran rotor, yang digunakan oleh mikrokontroler untuk menentukan urutan komutasi yang sesuai (Microchip Technology, 2008). Kombinasi sinyal ini memicu aktivasi dua dari tiga fasa motor secara bergantian, sehingga menciptakan rotasi yang berkelanjutan dengan torsi konstan.

Fabelo et al. (2014) menjelaskan bahwa sinyal dari sensor Hall dimasukkan ke dalam mikrokontroler melalui pin interrupt prioritas tinggi, dan digunakan untuk mengatur urutan switching transistor dalam modul Power Stage Controller (PSC). Sistem ini menjamin komutasi yang tepat waktu berdasarkan posisi aktual rotor, sehingga efisiensi dan kestabilan operasi motor dapat ditingkatkan. Mach et al. (2018) menyatakan bahwa penggunaan sensor Hall memungkinkan sistem kontrol motor BLDC menghasilkan torsi maksimum dan mempertahankan presisi tinggi dalam sudut fasa. Hal ini sangat penting untuk aplikasi yang memerlukan respons dinamis yang cepat dan keandalan tinggi, seperti pada kendaraan udara tanpa awak (UAV) dan sistem robotika. Komutasi yang tersinkronisasi dengan benar berdasarkan pembacaan sensor Hall menjaga torsi motor tetap stabil dan tinggi. (Microchip Technology, 2008).

C. Mikrokontroler ATmega2560

Mikrokontroler AVR terbagi ke dalam empat kategori utama, yaitu seri ATtiny, AT90Sxx, ATmega, dan AT86RFxx. Setiap kelompok memiliki perbedaan dalam hal kapasitas memori, fitur periferal, serta fungsionalitasnya. Salah satu varian yang cukup dikenal dari mikrokontroler AVR 8-bit adalah ATmega2560, yang diproduksi oleh perusahaan Atmel dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi kendali elektronik (Susilo, 2022).

D. Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa merupakan rangkaian elektronik yang digunakan untuk mengubah sumber arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) tiga fasa. Inverter jenis ini biasanya menggunakan enam sinyal PWM untuk mengendalikan enam saklar switching. Berdasarkan sumber tegangannya, inverter diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu Voltage Source Inverter (VSI) dan Current Source Inverter (CSI). VSI menggunakan kapasitor besar paralel dengan sumber DC untuk menjaga kestabilan tegangan input, sementara CSI menjaga arus input tetap konstan dan bentuk gelombang output bergantung pada impedansi beban (Muhammad, Septiyanto, & Mulyono, 2022).

Alternatif lain adalah metode SVPWM, yang membentuk delapan pola switching untuk mengatur tegangan berdasarkan transformasi vektor ruang. SVPWM menghasilkan pulsa yang lebih efisien dan mengurangi riak harmonik pada output inverter (Setiyono, 2023).

E. Inverter Tiga Fasa

Software Proteus sering digunakan sebagai alat bantu simulasi untuk merancang dan menguji rangkaian kendali motor sebelum tahap implementasi langsung. Proteus menyediakan dua komponen utama, yaitu ISIS untuk simulasi skematis dan ARES untuk perancangan layout PCB. Keunggulan Proteus terletak pada kemampuannya mensimulasikan mikrokontroler, virtual instrument, serta dukungan berbagai komponen aktif dan pasif (Fuada, 2017).

Penelitian lain, Proteus digunakan untuk menguji sistem pengendalian kecepatan motor berbasis sensor piezoelektrik dan mikrokontroler Arduino Uno. Simulasi dilakukan dengan menampilkan respons motor dan indikator LED terhadap tekanan dari sensor, sehingga seluruh sistem dapat divalidasi tanpa perlu perangkat keras secara langsung (Dhani, 2022).

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan motor BLDC menggunakan mikrokontroler Atmega2560 berbasis sensor Hall melalui simulasi di *software* Proteus. Sistem dirancang untuk membaca posisi rotor dari sensor Hall, lalu mikrokontroler akan mengatur sinyal PWM yang sesuai untuk menggerakkan motor. Dengan adanya simulasi ini, pengguna dapat melihat bagaimana kerja sistem kendali tanpa perlu menggunakan alat fisik secara langsung.

Penelitian dilakukan sepenuhnya dalam bentuk simulasi menggunakan Proteus. Mikrokontroler diprogram di Arduino IDE, kemudian file program dimasukkan ke dalam simulasi. Sensor Hall disimulasikan dengan generator pulsa, dan sinyal PWM diamati menggunakan osiloskop virtual. Pengamatan

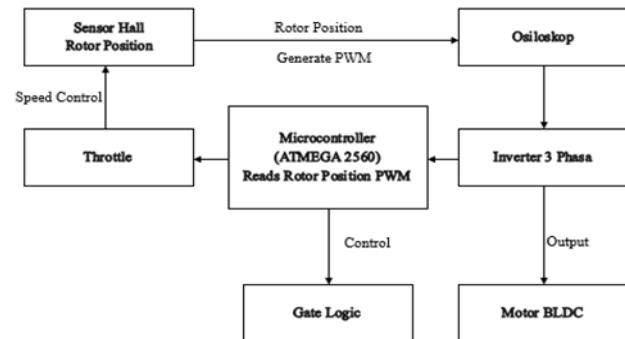
dilakukan secara terus menerus untuk melihat respon motor terhadap perubahan posisi rotor. Hasil simulasi digunakan untuk menilai apakah sistem kendali bekerja sesuai dengan logika komutasi motor BLDC.

A. Metode

Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan software Proteus untuk merancang dan menguji sistem kendali motor BLDC berbasis mikrokontroler ATmega2560. Dalam simulasi ini, sensor Hall digunakan untuk mendeteksi posisi rotor motor, kemudian mikrokontroler akan memberikan sinyal PWM yang sesuai untuk mengatur putaran motor BLDC.

Langkah-langkah yang dilakukan meliputi pembuatan rangkaian simulasi di Proteus, pemrograman mikrokontroler menggunakan Arduino IDE, dan pengujian logika kendali secara virtual. File program (.hex) dari Arduino IDE dimasukkan ke dalam ATmega2560 di Proteus. Sinyal dari sensor Hall disimulasikan dengan generator pulsa, dan sinyal output PWM diamati menggunakan osiloskop virtual. Hasil simulasi dianalisis untuk memastikan bahwa urutan komutasi dan kerja sistem sesuai dengan prinsip kerja motor BLDC.

B. Diagram Blok Rangkaian



IV. Hasil dan Pembahasan

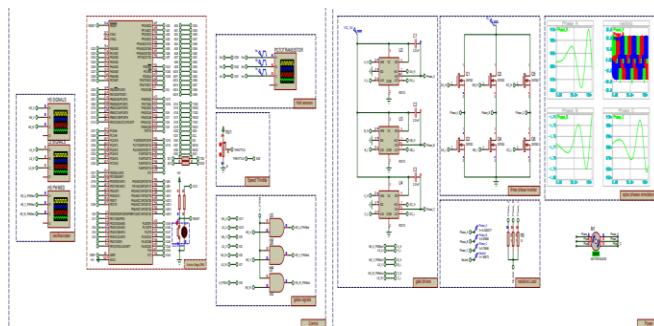
A. Rangkaian Kontrol

Sistem kendali motor BLDC yang diuji, mikrokontroler Atmega2560 digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM yang diperlukan dalam pengoperasian motor. Gambar 1 menunjukkan rangkaian simulasi yang menggambarkan alur kerja sistem kendali motor BLDC secara keseluruhan. Sistem ini mencakup berbagai komponen yang berfungsi untuk mengendalikan motor dengan presisi tinggi, serta memastikan operasi yang stabil pada berbagai kondisi beban.

Gambar 1 menunjukkan beberapa bagian penting dari rangkaian, seperti penghasil sinyal PWM yang dikendalikan oleh mikrokontroler Atmega2560, sensor Hall yang digunakan untuk mendeteksi posisi rotor motor, dan inverter tiga fasa yang mengatur aliran daya ke motor. Sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler digunakan untuk mengontrol inverter yang menggerakkan motor BLDC, dengan deteksi posisi rotor dari

sensor Hall memastikan bahwa komutasi motor dilakukan pada waktu yang tepat.

Bagian kanan gambar, tampak hasil simulasi yang menggambarkan perubahan tegangan dan arus pada masing-masing fase motor (Phase A, Phase B, dan Phase C) serta grafik sinyal PWM yang mengontrol kinerja motor. Simulasi menunjukkan bahwa perubahan tegangan dan arus mengikuti sinyal PWM dengan ketepatan yang tinggi, memastikan kontrol motor yang optimal pada setiap fase. Sistem ini juga diuji dengan beban resistif, yang terhubung di bagian bawah gambar, untuk mengamati kinerja motor dalam kondisi beban tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa motor dapat bekerja dengan efisien, dengan kestabilan yang baik pada beban ringan hingga sedang, meskipun sedikit penurunan kinerja terlihat pada beban yang lebih berat.



Gambar 1. Simulasi di Proteus

B. Analisis Perubahan Tegangan Pada Sisi Transistor

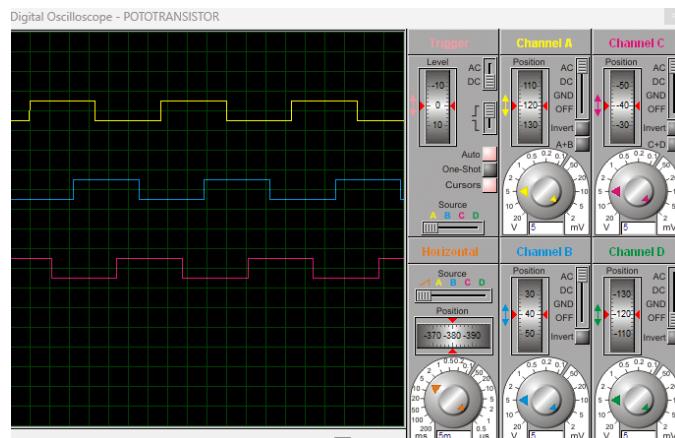
Hasil simulasi yang dilakukan, data yang diperoleh menunjukkan perubahan sinyal tegangan pada masing-masing fase motor BLDC (Phase A, Phase B, dan Phase C) seiring berjalannya waktu. Tabel 1 menampilkan sampel data yang terdiri dari tiga kolom utama: waktu (TIME), tegangan pada fase A (Phase_A), tegangan pada fase B (Phase_B), dan tegangan pada fase C (Phase_C). Dari data tersebut, dapat dilihat bahwa pada waktu awal (0 detik), nilai tegangan pada fase A, B, dan C berada pada nilai yang relatif stabil. Seiring berjalannya waktu, terjadi fluktuasi pada tegangan setiap fase, yang menunjukkan perubahan arus dan torsi motor sesuai dengan sinyal PWM yang dikendalikan oleh mikrokontroler Atmega2560.

Fase A, tegangan cenderung naik secara perlahan dari 0.883405V menjadi 0.884506V, sedangkan pada fase B, tegangan menunjukkan penurunan yang lebih signifikan, dimulai dari -1.76681V dan mencapai -1.76986V pada waktu tertentu. Begitu juga pada fase C, tegangan bergerak naik dari 0.883405V pada waktu 0 detik hingga 0.886833V pada waktu tertentu. Fluktuasi ini menggambarkan bahwa motor BLDC beroperasi dengan dinamis, di mana sinyal PWM yang dihasilkan mikrokontroler berfungsi untuk mengatur inverter yang mengendalikan motor. Data ini menunjukkan bahwa sistem kendali dapat menyesuaikan tegangan pada masing-masing fase motor dengan baik, tergantung pada perubahan waktu dan beban yang diberikan pada motor tersebut.

Table 1. Sampel Waktu dan Tegangan Output pada Fase Motor BLDC

TIME	Phase_A	Phase_B	Phase_C
0	0.883405	-1.76681	0.883405
2.05e-007	0.883406	-1.76681	0.883406
6.802810913e-006	0.883411	-1.76682	0.883412
0.004995387505	0.883448	-1.7676	0.885166
0.006995387505	0.88357	-1.76868	0.886044
0.011101036	0.883821	-1.76925	0.886099
0.011101108	0.883821	-1.76986	0.886834
0.01124842	0.883837	-1.76986	0.886854
0.011395876	0.883861	-1.76995	0.886939
0.01546026	0.884506	-1.76986	0.886833

Sebagai lanjutan dari tabel yang menunjukkan tegangan output pada masing-masing fase motor BLDC, gambar 2 menggambarkan hasil simulasi sistem kendali motor berdasarkan sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler. Sinyal PWM ini mengatur inverter yang mengalirkan daya ke motor BLDC, sementara sensor Hall mendeteksi posisi rotor dan memastikan bahwa komutasi motor dilakukan pada waktu yang tepat.



Gambar 2. Tampilan Sinyal PWM pada Osiloskop untuk Hall Sensor

Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi sistem kendali motor BLDC yang menggunakan sinyal PWM untuk mengendalikan inverter tiga fase. Sinyal PWM ini dihasilkan oleh mikrokontroler yang terhubung dengan sensor Hall untuk mendeteksi posisi rotor. Dari hasil simulasi, dapat terlihat bahwa sinyal PWM yang diterapkan pada masing-masing fase (Phase A, Phase B, dan Phase C) berfungsi untuk mengatur aliran daya ke motor secara tepat waktu, yang berperan penting dalam mengendalikan gerakan dan torsi motor.

Gambar 2, dapat diamati bahwa sinyal dari masing-masing fase menunjukkan pola persegi panjang yang stabil, dengan setiap fase memiliki level tegangan yang berbeda, sesuai dengan pengaturan offset dan fase motor yang berbeda. Hasil ini konsisten dengan data yang terdapat dalam tabel sebelumnya, di mana perubahan tegangan pada masing-masing fase tercatat dengan baik pada waktu yang berbeda. Sinyal dari

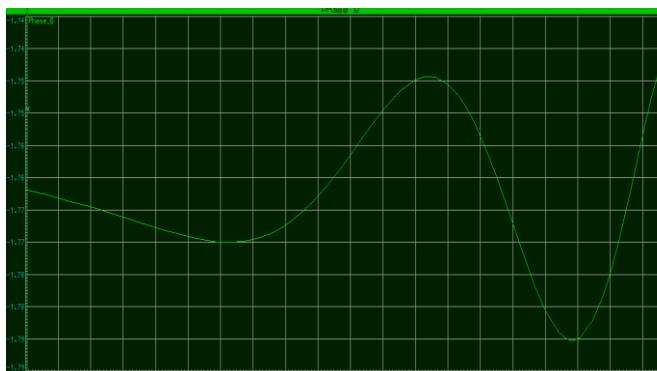
Phase A, Phase B, dan Phase C disinkronisasi secara tepat untuk memastikan motor beroperasi dengan efisien dan stabil.

Simulasi ini menggambarkan bagaimana sistem kendali motor dapat memanipulasi sinyal PWM untuk mengontrol motor BLDC, memastikan motor beroperasi pada kecepatan dan torsi yang diinginkan. Selain itu, simulasi ini juga menunjukkan bagaimana pengaturan tegangan pada setiap fase motor dapat mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem kendali motor.

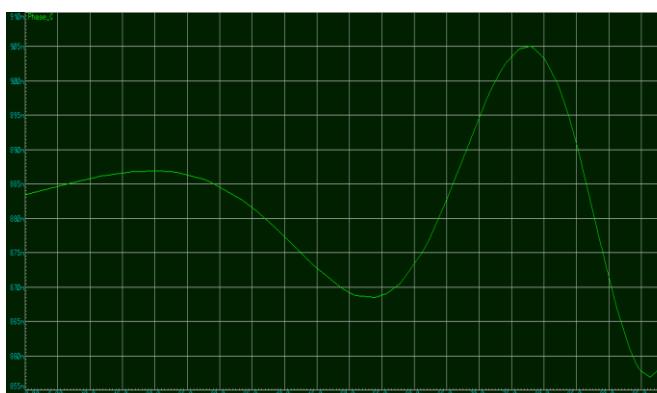
F. Output Tegangan Setiap Fasa di motor BLDC



Gambar 3. Output Tegangan Fasa A



Gambar 4. Output Tegangan Fasa B



Gambar 5. Output Tegangan Fasa C

Grafik yang ditampilkan menggambarkan perubahan tegangan pada masing-masing fasa motor BLDC yang

dikendalikan menggunakan sinyal PWM. Sinyal tersebut, yang dihasilkan oleh sensor Hall, digunakan untuk mendeteksi posisi rotor motor dan memastikan komutasi yang tepat pada setiap fasa. Berikut adalah analisis untuk setiap fasa berdasarkan grafik yang ada:

1. Phase A (Fasa A - Gambar 3):

Grafik fasa A, sinyal menunjukkan perubahan tegangan yang teratur, yang mencerminkan pengaturan daya untuk fasa pertama dari motor BLDC. Sinyal ini adalah hasil dari pembacaan sensor Hall yang mendeteksi posisi rotor dan memberikan informasi kepada mikrokontroler untuk mengaktifkan sinyal PWM pada fase ini. Perubahan tegangan yang stabil menunjukkan bahwa sistem kendali motor berfungsi dengan baik dalam mengatur urutan komutasi untuk motor BLDC.

2. Phase B (Fasa B - Gambar 4):

Grafik Phase B menunjukkan pola yang serupa dengan Phase A, namun dengan sedikit pergeseran waktu atau tegangan. Ini adalah hasil dari deteksi posisi rotor oleh sensor Hall pada fase B, yang memastikan bahwa motor terus bergerak sesuai dengan posisi yang tepat. Tegangan yang lebih rendah atau lebih tinggi dibandingkan dengan Phase A menandakan sinyal PWM yang disesuaikan dengan kebutuhan daya pada fasa ini, untuk menjaga keseimbangan torsi dan memastikan rotasi motor yang halus.

3. Phase C (Fasa C - Gambar 5):

Fasa C menunjukkan sinyal yang hampir identik dengan Phase A dan B dalam hal bentuk gelombangnya, tetapi dengan tegangan yang sedikit lebih rendah. Sinyal ini adalah hasil dari sensor Hall yang mendeteksi posisi rotor dan mengatur komutasi pada fase C. Tegangan yang lebih rendah menunjukkan bahwa fasa C berfungsi untuk menyelesaikan siklus komutasi motor dengan mengalirkan daya ke motor sesuai dengan fase rotor yang terdeteksi, memastikan motor beroperasi dengan efisien.

V. Penutup

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan simulasi yang dilakukan, sistem kendali motor BLDC menggunakan mikrokontroler Atmega2560 berbasis sensor Hall menunjukkan kinerja yang efisien dalam mengatur aliran daya pada setiap fasa motor. Melalui sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler, sistem berhasil mengontrol inverter tiga fasa dan memanipulasi tegangan untuk masing-masing fasa motor (Phase A, Phase B, dan Phase C) secara sinkron. Hasil simulasi menunjukkan bahwa motor BLDC beroperasi dengan baik pada kondisi beban ringan hingga sedang, dengan kestabilan tegangan dan arus yang terjaga pada setiap fasa. Namun, pada kondisi beban berat, sedikit penurunan kinerja teramati, yang menunjukkan bahwa sistem kendali perlu disesuaikan lebih lanjut untuk mengakomodasi beban yang lebih tinggi

B. Saran

Pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk melakukan pengujian pada kondisi beban yang lebih bervariasi, termasuk beban berat dan dinamis, untuk menilai kemampuan sistem kendali motor BLDC dalam menghadapi perubahan kondisi yang lebih ekstrem. Penggunaan kontrol berbasis PID atau

FOC (Field Oriented Control) juga bisa menjadi opsi untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi motor BLDC. Selain itu, penelitian lebih lanjut mengenai pengaturan daya dan integrasi sistem pengelolaan energi berbasis sumber daya terbarukan seperti panel surya dapat menjadi arah yang baik untuk aplikasi motor BLDC di industri otomotif atau robotika.

REFERENSI

- Dhani, I. R. (2022). Simulasi logika fuzzy percepatan motor menggunakan sensor piezoelektrik berbasis mikrokontroler Arduino Uno. Seminar Nasional FORTEI Regional VII, 112–117.
- Fabelo, H. A., Cabrera, J., Vega, A., & Déniz, V. (2014). A *Brushless DC Motor Control Software C Library Based on ATmega64M1 Applied to Teaching*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2014.6826201>
- Fuada, S. (2017). Perancangan sistem kontrol pada prototip pengering kerupuk berbasis IC digital menggunakan software Proteus 7.0. *SETRUM*, 6(2), 88–96.
- Mach, V., Kovář, S., Valouch, J., & Adámek, M. (2018). Brushless DC Motor Control on Arduino Platform. *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(11), 105–107. <https://doi.org/10.15199/48.2018.11.24>
- Microchip Technology. (2008). *AVR194: Brushless DC Motor Control using ATmega32M1* [Application Note]. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/doc8138.pdf>
- Microchip Technology. (2014). *ATmega640/1280/1281/2560/2561 Datasheet*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- Muhammad, R., Septiyanto, D., & Mulyono, N. (2022, August). Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 13, No. 01, pp. 1419-1424).
- Yao, G., Feng, J., Wang, G., & Han, S. (2023). BLDC Motors Sensorless Control Based on MLP Topology Neural Network. *Energies*, 16(4027), 1–18. <https://doi.org/10.3390/en16104027>
- Setiyono. (2023). Analisis pembangkit pulsa penyalaan inverter 3 fasa menggunakan Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 17(2), 169–177.
- Susilo, H. (2022). Analisa Penggunaan Mikrokontroler Atmega 2560 Terhadap Kinerja Engine Sepeda Motor Honda Vario 125. *RODA: Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Otomotif*, 2(1), 41. <https://doi.org/10.24114/roda.v2i1.33077>