

# PENGGUNAAN METODE PULSE WIDTH MODULATION (PWM) UNTUK MENGATUR TORSI MOTOR INDUKSI 3 FASA

Linda Sartika<sup>1</sup>, Abdul Muis Prasetya<sup>2</sup>, Hadi Santoso<sup>3</sup>, Muhammad Akbar<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

<sup>4</sup>MNCTV, Bulungan, Kalimantan Utara, Indonesia

<sup>2</sup>prasetya.electric@gmail.com

**Abstract**—Three-phase induction motors are widely used as energy conversion devices in various industrial applications and daily equipment. Although they offer advantages in durability and efficiency, induction motors exhibit nonlinear characteristics, making speed and torque control complex. To address this challenge, an inverter is required as a controller for the induction motor. The inverter functions to convert direct current (DC) voltage into alternating current (AC) voltage and, in this study, is designed with a Square Wave output. The control system employs the Pulse Width Modulation (PWM) method to regulate the inverter output, enabling the operation of a three-phase induction motor with a torque range of 0.00 to 0.1 kg/s and a duty cycle variation between 100% and 80%. Testing results indicate that this method provides more stable speed control and better responsiveness to load variations. Thus, the implementation of a PWM-based inverter offers an effective solution to enhance the efficiency and reliability of three-phase induction motor control systems.

**Keywords**—Induction motor, inverter, PWM, Square Wave, speed control.

**Intisari**—Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai konversi energi dalam berbagai aplikasi industri dan peralatan sehari-hari. Meskipun memiliki keunggulan dalam hal daya tahan dan efisiensi, motor induksi memiliki sifat tidak linier yang membuat pengaturan kecepatan dan torsi menjadi kompleks. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan penggunaan inverter sebagai pengendali motor induksi. Inverter berfungsi mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik dan dalam penelitian ini dirancang dengan bentuk gelombang *Square Wave*. Sistem pengendali menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengatur keluaran inverter, sehingga mampu mengoperasikan motor induksi tiga fasa dengan rentang torsi 0,00 hingga 0,1 kg/s serta *duty cycle* yang bervariasi antara 100% hingga 80%. Pengujian menunjukkan bahwa metode ini dapat memberikan kendali kecepatan yang lebih stabil dan responsif terhadap perubahan beban. Dengan demikian, implementasi inverter berbasis PWM dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kendali motor induksi tiga fasa.

**Kata kunci**—Motor induksi, inverter, PWM, *Square Wave*, kendali kecepatan.

## I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu jenis motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam industri. Motor ini mampu mengubah

energi listrik menjadi energi mekanik, sehingga sangat diperlukan dalam berbagai aplikasi produksi. Keunggulan utama motor induksi tiga fasa terletak pada konstruksinya yang sederhana, kuat, dan efisien dalam berbagai kondisi operasional. Karakteristik ini menjadikannya pilihan utama dibandingkan jenis motor lainnya yang mungkin lebih kompleks atau memiliki keterbatasan teknis tertentu [1,2].

Namun, di balik keunggulannya, motor induksi tiga fasa memiliki karakteristik non-linier yang menyebabkan kesulitan dalam pengaturan kecepatan dan torsi secara presisi. Hal ini menjadi tantangan bagi industri yang membutuhkan tingkat kontrol yang tinggi dalam proses produksinya. Karakteristik non-linier ini berarti bahwa hubungan antara arus, tegangan, dan kecepatan motor tidak bersifat langsung, sehingga mempersulit proses pengendalian motor dengan metode konvensional [3,4]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian yang efektif untuk mengoptimalkan performa motor ini, terutama dalam aplikasi industri yang membutuhkan presisi tinggi dalam pengaturan kecepatan dan torsi.

Salah satu metode yang banyak digunakan dalam pengendalian kecepatan dan torsi motor induksi adalah inverter. Inverter merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan arus bolak-balik (AC). Dengan menggunakan inverter, pengguna dapat mengendalikan kecepatan motor dengan lebih fleksibel karena inverter memungkinkan perubahan frekuensi tegangan keluaran. Hal ini sangat penting dalam berbagai aplikasi industri yang membutuhkan pengaturan kecepatan motor yang dinamis, seperti dalam sistem produksi otomatis dan peralatan berbasis servo yang memerlukan putaran dengan tingkat presisi tinggi.

Dalam penerapan inverter, salah satu teknik yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi pengendalian adalah *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM merupakan teknik modulasi yang merekayasa lebar pulsa sinyal untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang diinginkan. Metode ini bekerja dengan mengubah durasi pulsa dari sinyal listrik, sehingga dapat mengontrol daya yang dikirim ke motor tanpa menyebabkan kehilangan energi yang berlebihan. PWM banyak diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk dalam telekomunikasi, kontrol daya, serta sistem kendali motor [5-7]. Dengan adanya metode ini, inverter dapat menghasilkan keluaran tegangan yang lebih halus, sehingga pengendalian kecepatan dan torsi motor induksi menjadi lebih akurat dan efisien.

Berdasarkan potensi dan keunggulan metode PWM dalam pengendalian inverter motor induksi tiga fasa, penelitian ini akan merancang dan menganalisis desain inverter berbasis PWM guna mengoptimalkan kendali torsi motor induksi. Penelitian ini akan difokuskan pada dua aspek utama, yaitu merancang inverter yang efektif serta mengembangkan metode PWM yang optimal dalam pengendalian torsi motor.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa permasalahan yang akan dibahas. Pertama, bagaimana cara merancang inverter yang efektif untuk mengendalikan torsi motor induksi tiga fasa? Kedua, bagaimana merancang metode PWM yang mampu mengoptimalkan pengendalian torsi motor induksi tiga fasa? Kedua pertanyaan ini menjadi dasar dalam penelitian ini, dengan harapan dapat memberikan solusi yang efektif dalam bidang pengendalian motor listrik.

Untuk menjaga fokus penelitian, kajian ini hanya akan membahas aspek perancangan dan implementasi inverter berbasis PWM dalam pengendalian torsi motor induksi tiga fasa. Penelitian ini tidak akan mencakup aspek lain seperti efisiensi energi secara menyeluruh atau optimasi sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan. Pembatasan ini bertujuan agar penelitian dapat dilakukan dengan lebih mendalam dan terfokus pada aspek teknis dari inverter dan metode PWM.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan mengembangkan inverter tiga fasa yang mampu mengendalikan torsi motor induksi secara optimal. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang metode PWM yang dapat diterapkan secara efektif dalam sistem inverter untuk mengendalikan torsi motor induksi tiga fasa. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengendalian motor listrik.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengendalian motor induksi tiga fasa, terutama dalam penerapan metode PWM. Dengan adanya penelitian ini, akademisi dan praktisi industri dapat menggunakan hasil temuan sebagai referensi dalam mengembangkan sistem kendali motor listrik yang lebih efisien dan presisi. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut dalam bidang pengendalian motor berbasis inverter, baik untuk aplikasi industri maupun akademik.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Peralatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan berbagai peralatan untuk menunjang proses desain dan pembuatan inverter tiga fasa, yaitu:

#### 1. Power Supply

Digunakan untuk menyediakan tegangan sumber sebesar 5V dan 15V arus searah (DC). Tegangan 5V berfungsi untuk mengaktifkan mikrokontroler dan optocoupler, sedangkan tegangan 15V digunakan untuk mengaktifkan MOSFET dalam inverter.

#### 2. Osiloskop

Berfungsi untuk mengamati bentuk gelombang keluaran dari frekuensi dan sinyal PWM yang

dihasilkan oleh mikrokontroler, serta untuk menganalisis kestabilan sinyal.

### 3. Inverter Tiga Fasa

Perangkat utama dalam penelitian ini yang digunakan untuk mengontrol motor induksi tiga fasa. Inverter akan diuji untuk memastikan bahwa setiap fasa memiliki perbedaan sudut  $120^\circ$ .

### 4. Motor Induksi Tiga Fasa

Bertindak sebagai sistem uji (plant) dalam penelitian ini. Motor ini akan diuji untuk mengamati bagaimana torsi dapat dikontrol melalui variasi nilai duty cycle pada metode PWM.

Penelitian ini menggabungkan studi literatur dan pengujian laboratorium guna mengevaluasi komunikasi antara inverter tiga fasa dengan motor induksi tiga fasa dalam pengendalian torsi.

### B. Prosedur Penelitian

Proses penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebagai landasan dalam penelitian ini, termasuk penelaahan teori mengenai motor induksi tiga fasa, inverter, dan teknik PWM. Referensi yang digunakan meliputi artikel penelitian, buku teks, serta standar industri terkait.

#### 2. Perancangan Sistem

Berdasarkan hasil studi literatur, dilakukan perancangan sistem inverter tiga fasa yang bertujuan untuk menghasilkan keluaran dengan perbedaan sudut  $120^\circ$ . Perancangan ini mencakup pemilihan komponen dan desain skematik rangkaian.

#### 3. Implementasi dan Perakitan

Setelah rancangan sistem disusun, dilakukan proses perakitan perangkat keras, termasuk mikrokontroler, driver MOSFET, serta rangkaian inverter. Setiap komponen diuji secara individual sebelum digabungkan menjadi satu sistem.

#### 4. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan desain. Pengujian metode PWM dilakukan dengan variasi duty cycle untuk mengamati pengaruhnya terhadap tegangan keluaran dan kinerja motor. Pengujian frekuensi dilakukan dengan menggunakan osiloskop untuk memastikan kestabilan frekuensi keluaran inverter pada 50 Hz. Selain itu, pengujian beda fasa dilakukan untuk memastikan bahwa sudut fasa antar keluaran inverter sesuai dengan spesifikasi desain, yaitu  $120^\circ$ . Selanjutnya, dilakukan pengujian kombinasi untuk menguji keluaran gerbang AND pada inverter dalam menggabungkan sinyal PWM dan frekuensi. Pengujian tegangan inverter bertujuan untuk memeriksa tegangan keluaran inverter menggunakan osiloskop dan tang amper. Terakhir, dilakukan pengujian rangkaian inverter berbeban untuk mengevaluasi kinerja inverter saat diberikan beban, meliputi uji tanpa beban, uji dengan beban, serta uji tegangan dan arus.

#### 5. Analisis Hasil dan Evaluasi

Data hasil pengujian dianalisis untuk menilai kinerja inverter dalam mengendalikan torsi motor induksi tiga

fasa. Jika hasil pengujian menunjukkan ketidaksesuaian dengan desain awal, dilakukan modifikasi dan optimasi sistem.

#### 6. Penarikan Kesimpulan

Setelah semua data diperoleh dan dianalisis, kesimpulan dibuat berdasarkan keberhasilan penelitian dalam mencapai tujuan yang telah ditetapkan.

#### 7. Penyusunan Laporan

Semua tahapan penelitian dan hasil pengujian didokumentasikan secara sistematis untuk dijadikan referensi dalam pengembangan lebih lanjut.

### C. Desain Sistem

Penelitian ini berfokus pada desain inverter tiga fasa berbasis metode PWM untuk mengendalikan torsi motor induksi. Sistem yang dirancang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

1. Mikrokontroler sebagai unit pemrosesan utama yang menghasilkan sinyal PWM dan sinyal frekuensi untuk inverter.
2. Power Supply DC 220V sebagai sumber daya utama untuk inverter.
3. Inverter Tiga Fasa yang menerima sinyal PWM dan mengubah tegangan DC menjadi AC dengan beda fasa  $120^\circ$ .
4. Motor Induksi Tiga Fasa sebagai sistem uji untuk mengamati pengaruh inverter terhadap torsi motor.
5. Brake Controller untuk memberikan beban mekanis guna menguji performa motor dalam kondisi berbeda.

Desain sistem ini memastikan bahwa inverter dapat mengontrol motor dengan stabil dan sesuai dengan kebutuhan industri.

### D. Originalitas Penelitian

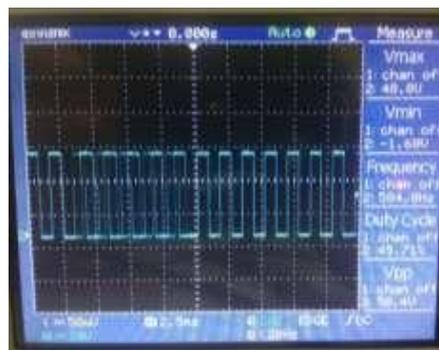
Penelitian ini memiliki nilai orisinalitas yang tinggi karena menggabungkan pendekatan eksperimen dan desain sistem yang dioptimalkan untuk pengendalian torsi motor induksi tiga fasa. Metode PWM yang digunakan dalam inverter dikembangkan dengan mempertimbangkan efisiensi dan stabilitas operasional. Selain itu, penelitian ini menitikberatkan pada pengujian dan validasi eksperimental guna memastikan bahwa sistem yang dirancang memiliki performa yang optimal.

Dengan metode yang sistematis serta analisis berbasis eksperimen, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi inverter dalam aplikasi industri.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pengujian PWM

Pengujian Pulse Width Modulation (PWM) bertujuan untuk mengetahui durasi pulsa high dan low dalam satu siklus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan meningkatkan nilai duty cycle, durasi waktu ON dari sinyal PWM juga meningkat. Perhitungan yang dilakukan berdasarkan pengamatan pada osiloskop menunjukkan bahwa frekuensi tetap konstan, sementara perubahan duty cycle mempengaruhi lebar pulsa.



Gambar 1. PWM duty cycle 50%

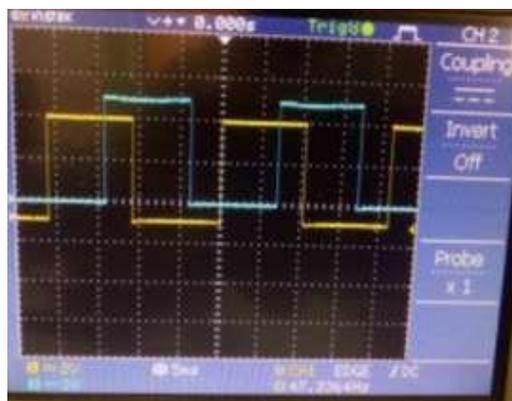
Sebagai contoh, pada duty cycle 50%, waktu ON dan OFF memiliki durasi yang sama yaitu 1.125 ms. Sementara itu, untuk duty cycle 90%, waktu ON meningkat menjadi 2.025 ms dan waktu OFF berkurang menjadi 0.225 ms. Dengan demikian, pengaturan duty cycle berperan penting dalam mengontrol daya yang diberikan kepada inverter dan motor induksi tiga fasa.

### B. Pengujian Frekuensi

Pengujian frekuensi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap fasa mendapatkan frekuensi yang sama. Berdasarkan pengukuran menggunakan osiloskop, frekuensi keluaran inverter tercatat sebesar 50 Hz, sesuai dengan nilai yang diharapkan untuk operasi normal motor induksi. Perhitungan frekuensi berdasarkan periode sinyal menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh sudah sesuai dengan spesifikasi sistem. Oleh karena itu, pengujian frekuensi ini menunjukkan bahwa inverter mampu menghasilkan sinyal AC dengan kestabilan frekuensi yang baik.

### C. Pengujian Masing-Masing Fasa

Dalam sistem motor induksi tiga fasa, perbedaan sudut antar fasa harus tetap  $120^\circ$ . Untuk memverifikasi hal ini, dilakukan pengukuran menggunakan osiloskop dengan mengamati keluaran dari inverter. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbedaan sudut antar fasa adalah  $120^\circ$ , sesuai dengan perhitungan teoritis. Jika terjadi penyimpangan dari nilai ini, maka akan muncul ketidakseimbangan dalam sistem, yang dapat menyebabkan gangguan operasi motor.



Gambar 2. Perbedaan sudut antar fasa  $120^\circ$

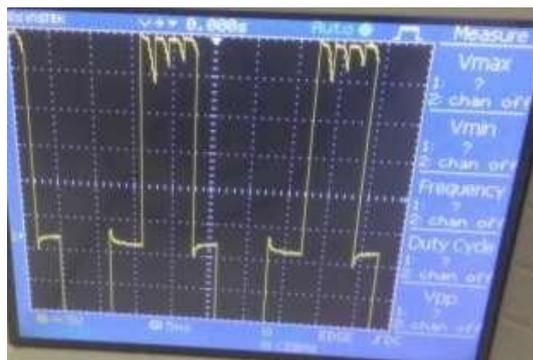
Dari pengamatan pada osiloskop, terlihat bahwa bentuk gelombang tiap fasa memiliki jarak dan amplitudo yang seragam. Hal ini menunjukkan bahwa sistem inverter mampu menghasilkan keluaran yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan operasional motor induksi tiga fasa.

#### D. Pengujian Kombinasi

Pengujian kombinasi dilakukan untuk memastikan bahwa sinyal PWM dan frekuensi dapat dikombinasikan dengan benar. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa keluaran gerbang AND memiliki karakteristik yang berbeda dari sinyal PWM atau frekuensi tunggal, menandakan bahwa kombinasi kedua sinyal telah berhasil. Dengan demikian, pengujian ini menunjukkan bahwa sistem kendali inverter bekerja dengan baik dalam mengatur sinyal masukan yang diberikan.

#### E. Pengujian Tegangan Inverter

Pengujian tegangan inverter dilakukan untuk mengukur keluaran tegangan antara fasa ke fasa (line-to-line) dan fasa ke netral (line-to-neutral). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan line-to-line mencapai 219.2 V, sementara tegangan line-to-neutral tercatat sebesar 132.5 V. Perhitungan ini didasarkan pada nilai puncak gelombang yang diukur menggunakan osiloskop.



Gambar 3. Tegangan line-to-line mencapai 219.2 V

Tegangan keluaran ini sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan oleh motor induksi tiga fasa. Manipulasi gelombang dilakukan dengan menggunakan MOSFET yang dikontrol berdasarkan sinyal PWM. Dalam pengoperasiannya, MOSFET diaktifkan dan dinonaktifkan secara bergantian untuk menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan sistem.

#### F. Pengujian Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Pengujian torsi merupakan tahap akhir dalam evaluasi kinerja sistem inverter. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi duty cycle dan mengamati perubahan torsi motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi duty cycle, semakin besar arus yang masuk ke motor, yang berpengaruh terhadap peningkatan torsi dan kecepatan putaran motor.

Pada tabel hasil pengujian inverter, terlihat bahwa dengan duty cycle 100%, kecepatan motor mencapai 1403 RPM dengan arus 0.32 A. Namun, saat duty cycle diturunkan ke 70%, motor mengalami penurunan kinerja akibat keterbatasan arus. Pada nilai duty cycle 60% ke bawah, motor mulai kehilangan daya dan pada duty cycle

50% tidak mampu beroperasi dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat batas operasional yang perlu diperhatikan dalam penggunaan inverter.

Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem inverter berbasis PWM mampu mengendalikan motor induksi tiga fasa dengan baik. Namun, terdapat batasan dalam operasionalnya, terutama terkait dengan arus maksimum yang dapat ditoleransi oleh motor. Pada duty cycle 70% dan lebih tinggi, arus yang dihasilkan meningkat hingga melampaui batas aman, yang dapat menyebabkan kegagalan sistem atau kerusakan komponen.

Efisiensi sistem dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan pengaturan duty cycle dan mengimplementasikan proteksi arus berlebih. Selain itu, kestabilan sistem dapat lebih ditingkatkan dengan memperbaiki regulasi sinyal PWM untuk menghindari fluktuasi tegangan yang berpotensi mengganggu operasi motor.

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa sistem inverter berbasis PWM yang dirancang telah bekerja sesuai dengan ekspektasi dalam mengendalikan motor induksi tiga fasa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keluaran yang stabil dengan perbedaan sudut fasa 120° antar tiap fasa, sesuai dengan spesifikasi desain. Selain itu, hubungan antara duty cycle dan tegangan keluaran inverter telah terkonfirmasi, di mana peningkatan duty cycle meningkatkan tegangan output dan torsi motor.

Namun, terdapat batasan dalam operasional sistem ini, terutama terkait dengan arus maksimum yang dapat ditoleransi oleh motor. Pada duty cycle di atas 70%, arus yang dihasilkan meningkat hingga melampaui batas aman, menyebabkan potensi kegagalan sistem atau kerusakan komponen. Oleh karena itu, optimasi lebih lanjut terhadap duty cycle dan pengaturan arus diperlukan untuk mencegah overcurrent serta meningkatkan efisiensi sistem.

Pengujian juga menunjukkan bahwa sistem inverter dapat bekerja dengan frekuensi yang stabil di sekitar 50 Hz, sehingga dapat diterapkan dalam berbagai aplikasi industri. Dengan implementasi proteksi arus dan stabilisasi sinyal PWM, sistem ini dapat lebih diandalkan dalam pengoperasian motor induksi tiga fasa secara efisien dan presisi.

Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah bahwa sistem inverter berbasis PWM yang dikembangkan telah memenuhi tujuan utama dalam pengendalian torsi motor induksi tiga fasa. Dengan perbaikan lebih lanjut, seperti penggunaan sensor arus yang lebih presisi dan peningkatan teknik kendali, sistem ini dapat diterapkan dalam industri untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas pengoperasian motor listrik.

## REFERENSI

- [1] N. Emmanuel, *Implementasi Inverter Sebagai Pengendali Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)*, Teknik Mekatronika, Politeknik Enjinerung Indorama, 2016.

- [2] Baharuddin, *Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis PWM (Pulse Width Modulation)*, Informatika, Universitas Hasanuddin, 2012.
- [3] R. I. Dwi, *Analisa Kestabilan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Berbasis Field Oriented Control (FOC)*, Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado, 2011.
- [4] Suhariningsih, *Pengaturan Motor Induksi Menggunakan Observer Self Constructing Fuzzy Neural Network dengan Metode Algoritma Pelatihan Levenberg Marquardt*, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, 2009.
- [5] M. W. Fatih, *Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Berbasis Genetic Algorithm*, Universitas Muhammadiyah Malang, 2016.
- [6] Sofwan and R. S. Baqo, "Sistem Pengendali Kecepatan Putaran Motor AC Fasa Satu Menggunakan Mikrokontroler AT89S825," *Jurnal Penelitian*, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta, 2004.
- [7] Muis, R. Aidil, and R. Faizal, "Analisis Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Inverter Berbasis Pulse Width Modulation," *BORNEO ENGINEERING: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 45-52, 2019.