

DESAIN KENDALI MOTOR UNIVERSAL MENGGUNAKAN INVERTER 1 FASA METODE SPWM

Krisdiyanto¹, Aripriharta^{2*}, Sujito³, Mohamad Rodhi Faiz⁴, Suhiro Wongso Susilo⁵, Ilham Faidzin⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5 Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL	ABSTRAK
<p>Received: July 07, 2023 Revised: August 26, 2024 Available online: Nopember 05, 2024</p>	
CORRESPONDENCE	ABSTRACT
<p>E-mail: aripriharta.ft@um.ac.id Phone: +62 821 3258 0202</p>	
	<p>Pengaturan kecepatan motor DC dan AC serta penghindaran arus pengasutan yang tinggi dapat dilakukan melalui berbagai cara, baik dengan peralatan mekanis maupun elektronik yang terkoneksi dengan motor. Salah satu teknik yang populer adalah penggunaan inverter dengan modulasi lebar pulsa (PWM), yang dikenal karena efisiensi dayanya yang tinggi, kemampuan untuk mengurangi kerugian harmonik, serta menghasilkan gerakan halus pada motor induksi dengan jangkauan kecepatan yang luas. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sebuah inverter SPWM (<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>) dengan kontrol berbasis mikrokontroler ATmega 8, yang diharapkan mampu mengatur kecepatan motor AC secara akurat. Desain inverter SPWM ini dibuat kompak dan hanya mengandalkan minimum sistem mikrokontroler, dengan sinyal PWM sinusoida yang dibangkitkan melalui perhitungan lebar pulsa pada <i>port timer</i> OCR1A dan OCR1B mikrokontroler. Pengujian menunjukkan bahwa sinyal SPWM yang dihasilkan memiliki 126 pulsa pada setiap setengah periode dengan jangkauan frekuensi antara 20-100 Hz dan penyesuaian frekuensi dalam kenaikan atau penurunan setiap 10 Hz. Hasil ini menunjukkan bahwa desain inverter SPWM yang dikembangkan berfungsi dengan baik, memberikan solusi yang efisien dan tepat dalam pengaturan kecepatan motor AC.</p> <p>Kata Kunci — Kendali, Inverter, SPWM, Motor, PWM</p>
	<p><i>Speed regulation of DC and AC motors and avoidance of high starting currents can be done through various means, either by mechanical or electronic equipment connected to the motor. One popular technique is the use of pulse width modulation (PWM) inverters, which are known for their high power efficiency, ability to reduce harmonic losses, and produce smooth motion in induction motors with a wide speed range. This research aims to design and build an SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) inverter with ATmega 8 microcontroller-based control, which is expected to be able to regulate the speed of an AC motor accurately. This SPWM inverter design is made compact and only relies on the minimum microcontroller system, with sinusoidal PWM signals generated through pulse width calculations on the microcontroller's OCR1A and OCR1B timer ports. Tests show that the generated SPWM signal has 126 pulses in each half period with a frequency range between 20-100 Hz and frequency adjustment in increments or decrements every 10 Hz. These results show that the developed SPWM inverter design works well, providing an efficient and appropriate solution in AC motor speed regulation.</i></p> <p><i>Keywords — Control, Inverters, SPWM, Motor, PWM</i></p>

I. PENDAHULUAN

Mesin listrik adalah perangkat yang sangat membantu dalam pekerjaan manusia, baik di rumah tangga maupun di skala industri. Motor universal merupakan motor yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti pada *vacuum cleaner*, blender, dan pada industri seperti mesin jahit, bor listrik, dan sebagainya. *Motor universal* pada dasarnya adalah jenis motor seri yang dapat berfungsi baik pada sumber listrik AC maupun DC [3].

Metode pengendalian dengan menggunakan konverter AC-AC hanya mampu mengatur tegangan, tetapi tidak dapat mengontrol frekuensi sehingga mengakibatkan keluaran tegangan yang tidak bersinusoidal dan mengandung banyak harmonisa. Dalam rangka mengatasi permasalahan tersebut, digunakanlah metode inverter DC-AC yang efektif untuk mengontrol motor induksi. Salah satu metode inverter yang banyak digunakan adalah *Pulse Width Modulation* (PWM), karena memiliki efisiensi daya yang tinggi, dapat

mengurangi kerugian harmonik, menghasilkan gerakan yang halus pada motor induksi, serta memiliki jangkauan operasi kecepatan yang luas. Pembangkitan sinyal PWM merupakan faktor krusial yang mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Pembangkitan sinyal PWM secara digital dapat menghasilkan sinyal yang lebih baik karena tidak terganggu oleh *noise*, namun memerlukan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode analog [6].

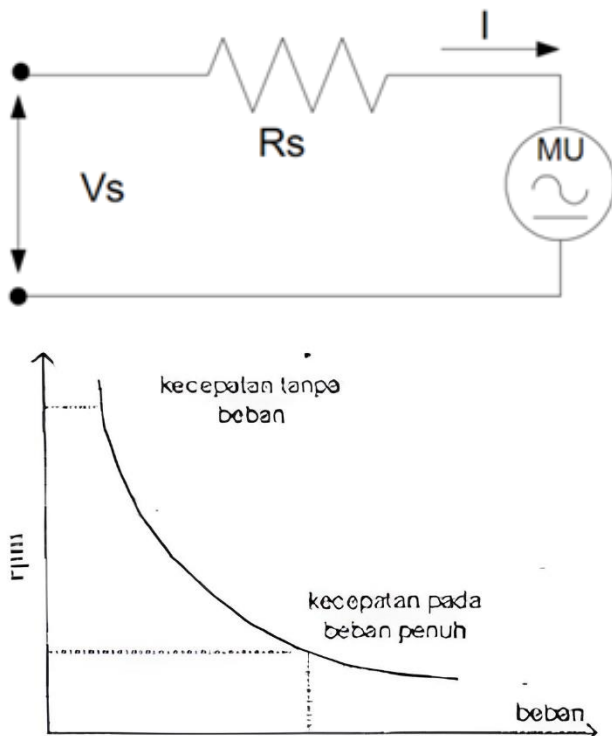
Untuk meningkatkan proses *switching*, digunakan metode inverter SPWM yang menggunakan kontrol *sine pulse width modulation* (SPWM) untuk mencapai pengaturan kecepatan motor universal yang lebih responsif dan halus.

II. LANDASAN TEORI

a. Motor Universal

Motor universal adalah motor seri AC yang memiliki konstruksi dan karakteristik yang serupa dengan motor seri DC [7].

Rangkaian ekuivalen dan karakteristik motor universal diperlihatkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen dan Karakteristik *Motor Universal*

Berdasarkan rangkaian ekuivalen pada gambar 1 untuk pengaturan kecepatan pada saat motor berputar dengan sumber DC maupun sumber AC dapat dihitung dengan persamaan (1) dan (2) [8].

$$N = K \cdot \frac{V_t - I_a R_a}{\phi} \quad (1)$$

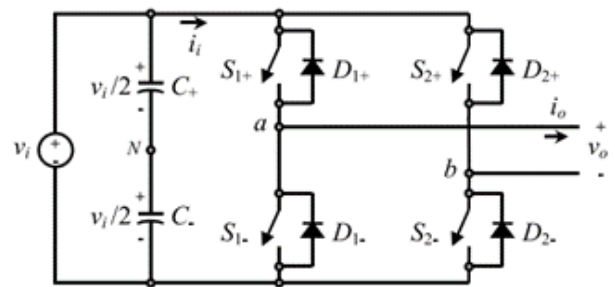
Apabila tegangan yang digunakan adalah tegangan AC, maka persamaan (2) berikut akan berlaku:

$$N = K \cdot \frac{V_t - I_a (R_a + R_{se} + j\omega L)}{K \cdot \phi} \quad (2)$$

Dalam analisis sistem motor, terdapat beberapa variabel yang memiliki peran penting. Variabel N merupakan kecepatan putar motor yang diukur dalam rpm (*rotations per minute*). Kemudian, variabel V_t menyatakan tegangan sumber yang diberikan kepada motor dalam satuan volt. Variabel I_a mengacu pada arus jangkar motor yang diukur dalam ampere (A). R_a merupakan resistansi beban jangkar yang diukur dalam ohm (Ω). Selanjutnya, R_{se} adalah resistor seri yang digunakan dalam sirkuit motor dan juga diukur dalam ohm (Ω). Terakhir, Φ melambangkan fluks magnetik yang tercipta dalam motor, diukur dalam weber (wb). Dalam perhitungan dan analisis sistem motor, variabel-variabel ini sering diperhitungkan dengan menggunakan angka konstanta pembanding K yang memungkinkan korelasi antara variabel-variabel tersebut.

b. Inverter 1 Fasa

VSD (*variable speed drive*) bekerja dengan mengubah frekuensi untuk mengontrol kecepatan motor. Dengan mengubah frekuensi tegangan yang diberikan pada motor menggunakan VSD, kecepatan motor akan dapat diatur [9]. Pada gambar 2 di-tunjukkan *full bridge VSI* 1 fasa.



Gambar 2. *Full Bridge VSI* 1 Fasa

Prinsip dasar kerja inverter dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Tegangan AC 50 Hz yang masuk dari jala-jala dialirkan ke *board rectifier* atau penyearah DC dan ditampung ke dalam *capacitor* bank. Dengan demikian, tegangan AC diubah menjadi tegangan DC.
- Setelah diperoleh tegangan DC yang murni, langkah berikutnya adalah mengubahnya menjadi tegangan AC menggunakan rangkaian inverter. *Sine Pulse Width Modulation* (SPWM).

Dengan menggunakan rumus berikut, inverter PWM sinusoidal satu fase dapat menghasilkan pulsa PWM bolak-balik pada satu fase. Nilai tegangan efektif bolak-balik dapat dihitung dengan cara ini:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (3)$$

Dalam konteks tegangan, terdapat beberapa istilah yang perlu dipahami. V_{rms} mengacu pada tegangan efektif, yang merupakan nilai tegangan yang setara dengan tegangan DC yang dapat menghasilkan daya yang sama pada beban resistif. Simbol v digunakan untuk merepresentasikan fungsi tegangan, yang dapat berupa tegangan sinusoidal atau

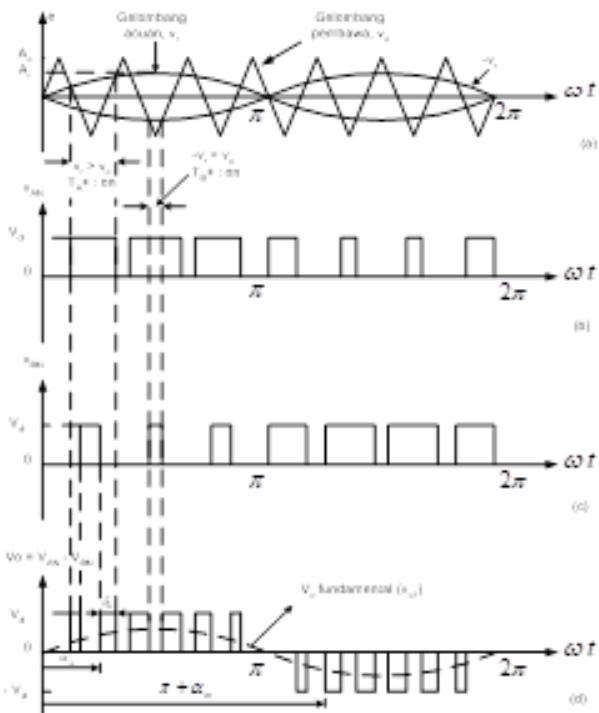
gelombang lainnya. Sedangkan T adalah periode, yaitu waktu yang diperlukan untuk melengkapi satu siklus lengkap dari fungsi tegangan tersebut. Pemahaman terhadap konsep ini penting dalam analisis dan pengukuran tegangan dalam sistem listrik. Karena nilai tegangan masukan DC pada inverter SPWM adalah konstan, maka nilai tegangan rms dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{rms} = V_{dc} \sqrt{\frac{\sum t_p}{T}} \quad (4)$$

dengan

Dalam pernyataan tersebut, terdapat beberapa istilah yang digunakan untuk menjelaskan hubungan antara tegangan efektif (V_{rms}), tegangan DC inverter (V_{DC}), lebar pulsa tinggi dalam satu periode (t_p), dan periode (T). Tegangan efektif (V_{rms}) merupakan ukuran tegangan rata-rata pada siklus waktu tertentu, sedangkan tegangan DC inverter (V_{DC}) adalah tegangan konstan yang digunakan dalam inverter. Lebar pulsa tinggi (t_p) mengacu pada durasi waktu di mana sinyal PWM memiliki tegangan tinggi, sedangkan periode (T) adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus lengkap dari sinyal PWM.

Untuk menghasilkan sinyal PWM dengan menggunakan dua sinyal sinus dan satu segitiga atau satu sinyal sinus dan dua segitiga, amplitudo sinyal segitiga dan sinus dibandingkan. Jika amplitudo sinyal sinus lebih besar daripada amplitudo sinyal segitiga, maka akan muncul sinyal penggerak. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, amplitudo dua sinyal segitiga dan dua sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang sama dibandingkan; jika amplitudo sinyal sinus lebih besar daripada amplitudo sinyal segitiga, sinyal penggerak ditarik dan digunakan untuk melakukan pengalihan switch, yang menghasilkan sinyal PWM [10].

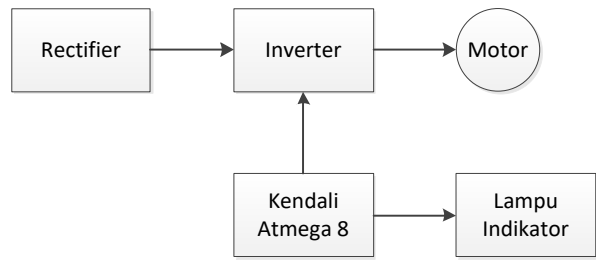


Gambar 3. Proses Pembedingan Sinyal SPWM

III. METODE

a. Perancangan Alat

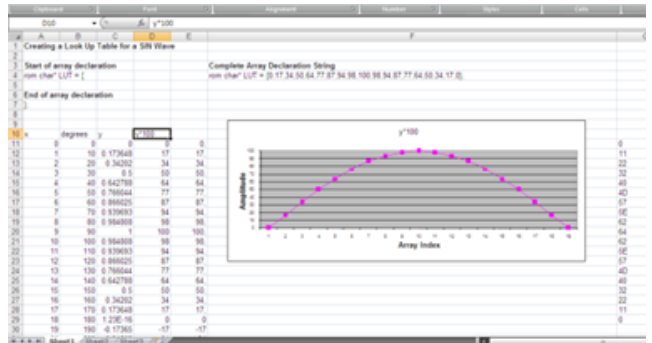
Diagram blok keseluruhan pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Alat Keseluruhan

b. Perancangan Perangkat Lunak

Untuk menciptakan sinyal PWM sinusoidal, diukur lebar pulsa yang akan dihasilkan. Untuk menghasilkan sinyal PWM sinusoidal, dilakukan pengukuran lebar pulsa yang akan dibangkitkan. Kemudian, hasil pengukuran tersebut digunakan untuk menentukan nilai pengisi *timer* pada mikrokontroler agar dapat menghasilkan lebar pulsa yang sama. Untuk mengurangi beban komputasi pada mikrokontroler ATmega8, pengukuran lebar pulsa dilakukan dengan menggunakan program Microsoft Excel. Program ini mengacu pada proses pembangkitan sinyal PWM sinusoidal melalui tabel seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.



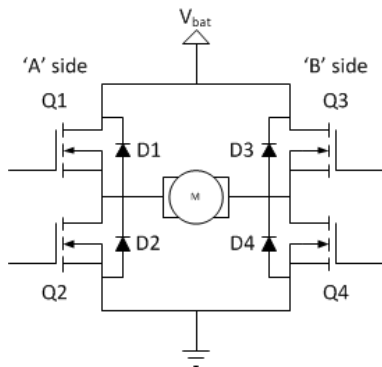
Gambar 5. Perhitungan Lebar Pulsa Untuk Pembangkitan SPWM Secara Tabel

Untuk membuat lebar pulsa sesuai pola gelombang sinus seperti pada gambar (5) maka kita harus membuat gelombang sinus dengan penanda titik setiap derajatnya pada sumbu (x) kemudian dikalikan 10 untuk mendapatkan degrees, sehingga untuk mendapatkan lebar pulsanya pada sumbu (y) bisa dihitung menggunakan rumus pada persamaan (5).

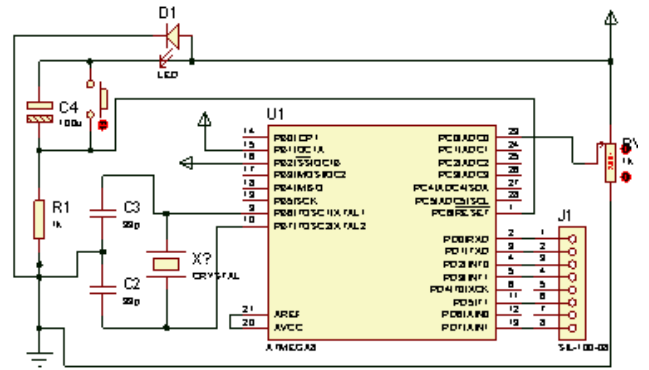
$$y = \sin.rad(degrees) \quad (5)$$

Untuk menentukan amplitudo gelombang maka (y) dikalikan 100 untuk dijadikan angka desimal. Setelah mendapatkan lebar pulsa dalam bentuk desimal agar bisa dioperasikan dalam bahasa C pada pemrograman maka hasil desimal dikonversi ke bentuk hexadesimal.

Pembangkitan pulsa PWM sinusoidal dilakukan sepenuhnya oleh timer1. Timer 1 OCR1A bertanggung jawab membangkitkan sinyal pada penggerak Q1 dan Q4. Sedangkan timer1 OCR1B bertanggung jawab membangkitkan sinyal pada sisi penggerak Q2 dan Q3, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.

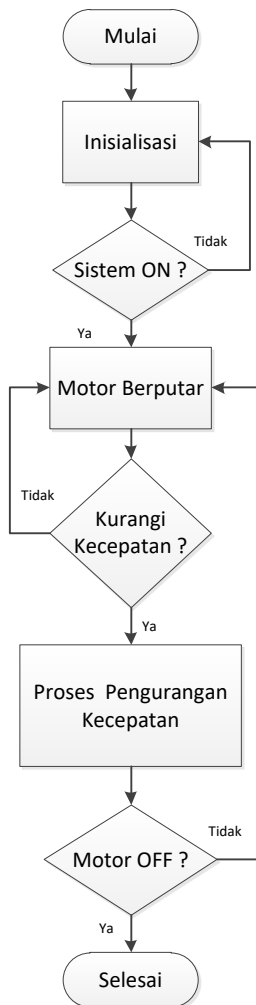


Gambar 6. Rangkaian H-Bridge



Gambar 8. Rangkaian Minimum Sistem ATmega 8

c. Flowchart Program Utama



Gambar 7. Flowchart Program Pengendalian Motor

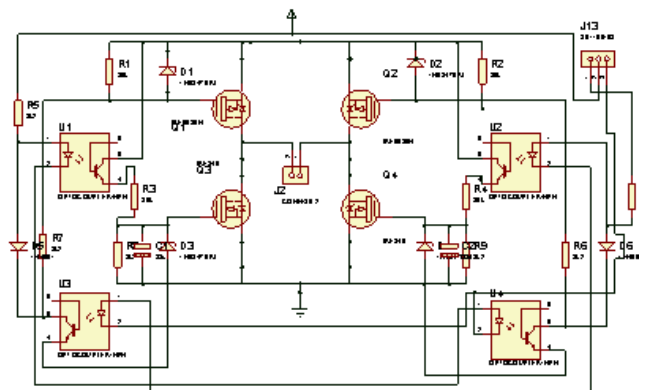
d. Rangkaian Minimum Sistem ATmega 8

Rangkaian minimum sistem atmega 8 merupakan rangkaian kendali utama yang akan menghasilkan sinyal SPWM dan sebagai kendali rangkaian lampu indikator kecepatan. Rangkaian minimum sistem AT mega 8 pada gambar 8.

Port B1 dan port B2 akan berfungsi menjadi output sebagai timer 1 yaitu OCR1A dan OCR1B.

e. Rangkaian H-Bridge Inverter

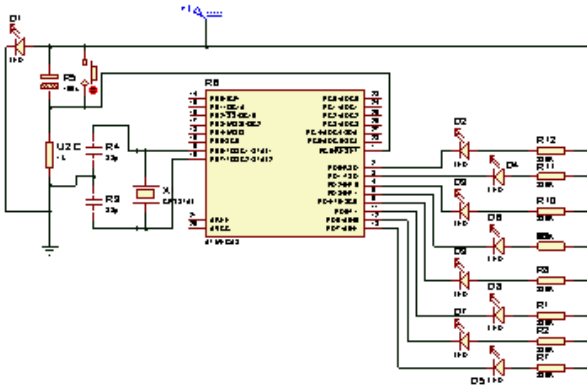
Rangkaian H-Bridge memiliki peran ganda, yaitu sebagai konverter tegangan DC menjadi tegangan AC dan sebagai rangkaian saklar dengan tegangan sekitar 50 VDC. Karena bekerja pada frekuensi tinggi dengan rentang 50 Hz sampai 700 Hz, MOSFET yang digunakan pada penelitian ini adalah IRF840 dan IRF9530. MOSFET ini memiliki *turn-on delay time* sebesar 60 ns dan *turn-off delay time* sebesar 140 ns, dengan tegangan maksimal *Drain-Source* (VDS) sebesar 500 volt dan arus maksimal (ID) sebesar 8 Ampere untuk IRF840. Sedangkan untuk IRF9530 memiliki tegangan maksimal *Drain-Source* (VDS) sebesar -100 Volt dan arus *drain* maksimal (ID) sebesar 14 Ampere. Rangkaian H-Bridge Inverter dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Rangkaian H-bridge Inverter

f. Rangkaian Indikator Kecepatan

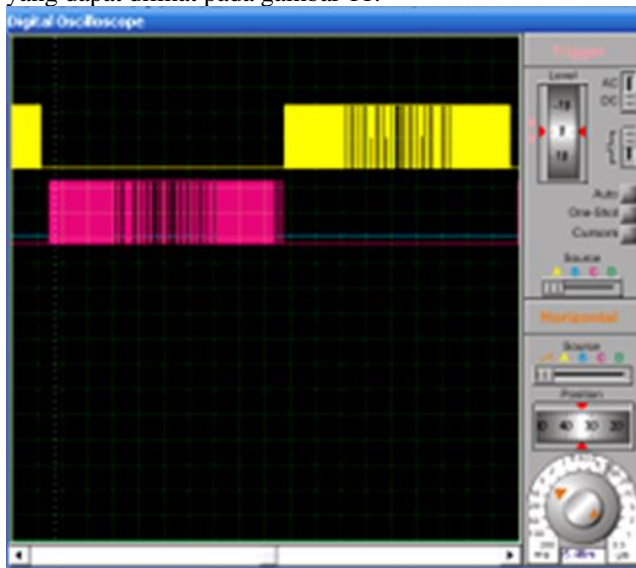
Rangkaian yang dimaksud berperan sebagai mengindikasikan kecepatan motor saat beroperasi. Rangkaian ini bekerja dengan mengonversi data analog dari pembagi tegangan variabel resistor menjadi data digital dalam bentuk biner 8 bit melalui pengonversian ADC (*Analog To Digital Converter*). Rangkaian indikator kecepatan ini ditampilkan pada gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian Lampu Indikator Kecepatan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rangkaian minimum sistem ATmega 8 menghasilkan keluaran berupa sinyal SPWM yang menjadi penggerak untuk pasangan MOSFET Q1+Q4, serta keluaran OCR1B yang digunakan sebagai pasangan penggerak Q2+Q3. Untuk memastikan agar pasangan penggerak bekerja sesuai teori, keluaran pada *port* B1 dan *port* B2 dibuat berkebalikan. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa keluaran dari *port* B1 berkebalikan dengan keluaran dari *port* B2, seperti yang dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Simulasi Keluaran Sinyal SPWM dari ATmega8

Setelah simulasi selesai, program yang disimulasikan diunduh ke mikrokontroler untuk memastikan bahwa program tersebut dapat berjalan dengan benar pada perangkat fisik tersebut. Setelah program diunduh, keluaran mikrokontroler diperiksa. Osiloskop adalah alat yang digunakan untuk mengukur dan memvisualisasikan sinyal listrik secara grafis dan digunakan untuk melihat dan menganalisis keluaran tersebut. Dalam hal ini, osiloskop menampilkan keluaran yang dihasilkan oleh mikrokontroler. Dengan menggunakan osiloskop, mikrokontroler dapat yang ditunjukkan pada Gambar 12. mengumpulkan informasi tentang amplitudo, frekuensi, periode, dan bentuk gelombang dari sinyal keluaran, seperti Osiloskop digunakan untuk melakukan analisis lebih lanjut terhadap keluaran mikrokontroler, memastikan bahwa program yang diunduh berfungsi dengan baik, dan melakukan *debugging*

jika diperlukan. Gambar 12 menunjukkan ilustrasi visual yang membantu memahami dan mengevaluasi kinerja mikrokontroler yang telah diprogram.



Gambar 12. Keluaran Sinyal SPWM ATmega 8 Pada Osiloskop

Sinyal keluaran dari inverter ditampilkan pada Gambar 13, di mana dengan menggunakan frekuensi masukan sebesar 100 Hz, diperoleh sinyal keluaran yang sesuai dengan pengamatan pada osiloskop. Namun, terdapat perbedaan kecil antara frekuensi masukan dan keluaran, yaitu sekitar ± 111 Hz. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh kurangnya akurasi dalam memasukkan tegangan analog sebagai variabel pengubah frekuensi pada *port* ADC mikrokontroler. Ketidaktepatan ini mengindikasikan perlunya penyempurnaan dalam pengaturan *input* tegangan analog untuk memastikan bahwa frekuensi keluaran lebih konsisten dan akurat sesuai dengan nilai yang diharapkan.



Gambar 13. Sinyal Keluaran Inverter Pada Frekuensi Masukan 100 Hz

Pengujian dilakukan dengan memantau kemampuan motor untuk berputar baik dalam kondisi tanpa beban (beban 0) maupun saat diberi beban (berbeban). Tujuannya adalah untuk mengevaluasi performa motor dan sistem inverter dalam berbagai kondisi operasional. Pada Tabel 1 ditampilkan hasil pengujian putaran motor dalam kondisi tanpa beban, sedangkan Tabel 2 menampilkan hasil pengujian ketika motor diberi beban. Data ini memberikan gambaran tentang bagaimana beban mempengaruhi kecepatan putaran motor dan memungkinkan analisis lebih lanjut terkait efisiensi sistem serta stabilitas motor dalam menanggapi perubahan beban.

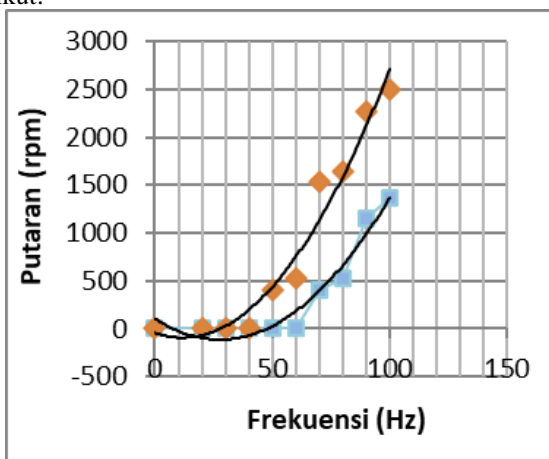
TABEL I. HASIL PENGAMBILAN DATA PUTARAN MOTOR DENGAN BEBAN 0

No	Arus (ampere)	Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)
1.	0	0	0
2.	0	0	20
3.	0	0	30
4.	0	0	40
5.	0,46	411	50
6.	0,46	521	60
7.	0,46	1528	70
8.	0,46	1638	80
9.	0,46	2265	90
11.	0,46	2490	100

TABEL II. HASIL PENGAMBILAN DATA PUTARAN MOTOR DENGAN BEBAN.

No	Arus (ampere)	Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)
1.	0	0	0
2.	0	0	20
3.	0	0	30
4.	0	0	40
5.	0,46	0	50
6.	0,55	0	60
7.	0,55	411	70
8.	0,6	521	80
9.	0,6	1148	90
11.	0,6	1373	100

Dari kedua data di atas maka bisa dibuat grafik sebagai berikut:



Gambar 14. Grafik Hubungan Frekuensi dan Putaran Motor Dengan Beban 0 (blue)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan putaran motor AC mengalami penurunan yang signifikan saat beroperasi dalam kondisi berbeban dibandingkan dengan kondisi tanpa beban. Pada frekuensi 100 Hz, kecepatan maksimum motor turun dari 2490 rpm tanpa beban menjadi 1373 rpm dengan beban, yang menunjukkan penurunan sebesar 54,92%. Penurunan ini disertai dengan peningkatan arus dari 0,46 ampere pada kondisi tanpa beban menjadi 0,6 ampere saat motor dibebani.

Penurunan kecepatan ini mengindikasikan bahwa beban kerja motor secara langsung mempengaruhi efisiensi dan performa sistem inverter SPWM. Hasil ini penting untuk diperhatikan dalam aplikasi praktis, di mana perlu dilakukan penyesuaian desain dan kontrol untuk menjaga stabilitas serta kinerja motor, terutama saat beroperasi di bawah beban yang bervariasi.

V. KESIMPULAN

Hasil dari simulasi, pengamatan, dan pengujian yang dilakukan pada rancangan yang dibuat ditunjukkan di sini. Pertama, desain kendali motor menggunakan sinyal PWM satu fase jenis PWM sinusoida. Sinyal SPWM memiliki 126 pulsa per setengah periode, dan rentang frekuensi operasi dapat disesuaikan antara 20 dan 100 Hz dengan kenaikan dan penurunan setiap 10 Hz, memberikan fleksibilitas. Pengujian dengan *loop* terbuka menunjukkan respons yang baik pada motor. Selain itu, mikrokontroler yang menangani data *input analog to digital* (ADC) dapat dengan sangat akurat mengolah data yang diberikan oleh sensor. Secara keseluruhan, hasil pengamatan, pengujian, dan simulasi menunjukkan bahwa desain kendali motor yang menggunakan sinyal PWM satu fase jenis PWM sinusoida memberikan kendali yang presisi dan adaptabilitas yang baik terhadap motor. Pengelolaan data *input analog to digital* pada mikrokontroler juga terbukti efektif, memastikan respons yang baik dalam mengatur putaran motor.

VI. REFERENSI

- [1] Aripriharta, 2003. Monitoring Ripple Arus Jangkar Motor Penguatan Terpisah 2000 rpm 220volt yang Dicatu Oleh Inverter1 fasa. Lap Mesin Elektrik FT Unibraw.
- [2] Usman, Hasrudin, Tanpa Tahun. Aplikasi Mikrokontroler Atmega8535 Sebagai Pembangkit Pwm Sinusoida 1 Fasa Untuk Mengendalikan Putaran Motor Sinkron. S-1 Teknik Elektro – UGM, Yogyakarta.
- [3] Yunanda Raharjanto, “SEQUENTIAL SOFT START DAN SOFT STOP UNTUK KENDALI MOTOR UNIVERSAL MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER AT89S51 Oleh : Yunanda Raharjanto *) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro” pp. 1–12, 2011.
- [4] U. A. Pringsewu, M. K. Praongga, and R. Rahmadewi, “SISTEM PEMELIHARAAN MOTOR LISTRIK 3 FASA PADA REAKTOR GA-243 (STUDI KASUS PT SINTAS KURAMA PERDANA),” vol. 6, no. 1, pp. 95–103, 2024.

- [5] Rashid, 2001. POWER ELECTRONICS HANDBOOK. Canada. Academic Press.
- [6] A. Mery Nur Laili, Muhammad Cahyo Bagaskoro, Langlang Gumilar, Mohamad Rodhi Faiz, "Perancangan Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive," J. Kaji. Tek. Elektro, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2023.
- [7] P. S. Wibowo and S. Riyadi, "SPWM Volt/Hz Based Speed Control of Induction Motor," Proc. - 2019 Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun. Ind. 4.0 Retrospect. Prospect. Challenges, iSemantic 2019, pp. 482–486, 2019, doi: 10.1109/ISEMANTIC.2019.8884311.
- [8] "Speed Control of Universal Motor Using Single Phase Inverter with PWM Technique" oleh A. K. Samal dan R. K. Jena, dipublikasikan di International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, no. 5, hal. 1683-1690, September-Oktober 2013.
- [9] "Performance Analysis of Single Phase Inverter-Fed Universal Motor Drive Using Improved SPWM Technique" oleh A. J. Sabir, M. S. Islam, dan S. A. Talukder, dipublikasikan di International Journal of Power Electronics and Drive System, vol. 12, no. 2, hal. 725-734, Juni 2021.
- [10] "Single-Phase Inverter Control for Universal Motor Using Simple Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation Technique" oleh N. N. Pandit dan S. D. Shelke, dipublikasikan di Journal of Electrical Systems and Information Technology, vol. 8, no. 1, hal. 1-14, Maret 2021.
- [11] A. Firmansah, Aripriharta, N. Mufti, A. N. Affandi, and I. A. E. Zaeni, "Self-powered IoT Based Vibration Monitoring of Induction Motor for Diagnostic and Prediction Failure," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 588, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/588/1/012016.
- [12] O. J. Tola, E. A. Umoh, and E. A. Yahaya, "Pulse Width Modulation Analysis of Five-Level Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicle Applications," Int. J. Robot. Control Syst., vol. 1, no. 4, pp. 477–487, 2021, doi: 10.31763/ijrcs.v1i4.483.