

Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno

Puji Astuti¹, Hendri Masdi²

^{1,2}Universitas Negeri Padang
pujiast299@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi dalam bidang transportasi yaitu pada kendaraan listrik berkembang cukup pesat karena krisis bahan bakar fosil. Pada kendaraan listrik, terdapat penggerak utama agar kendaraan listrik dapat berjalan yaitu menggunakan motor listrik. Salah satu penggerak yang digunakan pada kendaraan listrik adalah motor DC jenis Permanent Magnet yaitu motor BLDC karena sistem komutasi pada motor BLDC berkomutasi secara elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi. Metode yang digunakan dalam pembuatan alat ini yaitu menggunakan mikrokontroler Arduino Uno sebagai kontroler yang mendapat sinyal input atau masukan dari pembacaan *Hall Effect* Sensor terhadap perubahan medan magnet pada saat motor BLDC berputar yang terjadi di dalam motor BLDC. Jenis motor yang digunakan yaitu motor BLDC 1000 Watt dengan tegangan 48 Volt yang menggunakan Inverter 3 Fasa untuk pengendalian motor BLDC. Pengontrolan kecepatan motor BLDC menggunakan *keypad* untuk mengatur besaran nilai *duty cycle* yang mengirimkan data berupa nilai ADC (*Analog Digital Converter*) ke mikrokontroler kemudian dirubah menjadi sinyal PWM (*pulse Width Modulation*) melalui *inverter*. Berdasarkan hasil penelitian, kendali kecepatan motor BLDC menggunakan PWM adalah dengan mengendalikan nilai *duty cycle*. Penambahan nilai *duty cycle* dapat mempengaruhi nilai tegangan motor. Semakin tinggi nilai *duty cycle*, maka nilai tegangan juga akan meningkat. Ketika nilai tegangan meningkat, maka nilai arus juga akan meningkat. Arus sebanding dengan kecepatan pada motor sehingga kecepatan motor juga akan meningkat. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan tegangan dan arus berbanding lurus dengan rpm motor.

Abstract

The effect of the fossil fuel crisis has accelerated the development of technology in the sector of transportation, particularly in electric vehicles. There is a prime mover in electric vehicles that allows them to operate, which is an electric motor. One of the drives that are extensively utilized in electric vehicles is a DC motor of the Permanent Magnet type known the BLDC because its commutation system commutes electrically, resulting in excellent efficiency. The Arduino Uno microcontroller is employed as a controller for this tool, and it receives an input signal or input from the Hall Effect reading. Changes in the magnetic field that occur in the BLDC motor are detected by sensors. The motor utilized is a 1000 Watt BLDC motor with a voltage of 48 Volts that is controlled by a three-phase inverter. Controlling the speed of the BLDC motor with a keypad to adjust the duty cycle, which sends data in the form of ADC (Analog Digital Converter) values to the microcontroller then converts it into a PWM signal (Pulse Width Modulation) through an inverter, allowing the BLDC motor's speed to be controlled as desired. The greater the value of the Duty Cycle then the speed of the BLDC motor will be higher and vice versa. According to the findings, indirect PWM control regulates the duty cycle, which affects the voltage on the BLDC motor; when the voltage rises, the current in the BLDC motor rises as well. Because the current is proportional to the motor's speed, the motor's speed will likewise increase. Both tests show that the motor rpm value is directly proportional to the voltage and current values.

INFO.

Info. Artikel:

No. 216

Received. January 17, 2022

Revised. January 24, 2022

Accepted. January 31, 2022

Page. 120-135

Kata kunci:

- ✓ Motor BLDC,
- ✓ Arduino Uno,
- ✓ PWM,
- ✓ Inverter Tiga Fasa,
- ✓ Duty Cycle

PENDAHULUAN

Perkembangan dunia otomotif yang cukup pesat membutuhkan banyak bahan bakar minyak untuk bahan bakar kendaraan bermotor yang berakibat pada krisinya bahan bakar fosil. Penggunaan minyak bumi pada tahun 2017 sebesar 56,9% dan tahun 2018 meningkat menjadi 58%. Karena ketersediaan sumber daya alam tersebut tidak bisa diperbaharui maka industri otomotif mengembangkan kendaraan listrik yaitu mobil jenis *Hybrid*, dan mobil listrik[1]. Pada kendaraan listrik, terdapat penggerak utama agar kendaraan listrik dapat berjalan yaitu motor listrik. Motor listrik DC yang sering digunakan membutuhkan biaya perawatan yang tinggi karena menggunakan brush dalam komutasi motor. Brush pada motor DC akan cepat mengalami kerusakan seiring dengan penggunaannya[2]. Untuk mengatasi masalah tersebut maka digunakan Motor Arus Searah Tanpa Sikat atau motor BLDC karena memiliki kelebihan torka motor tinggi dan pengaturan kecepatannya mudah[3].

Motor BLDC merupakan motor sinkron magnet permanen yang pada kontrol motor disuplai sumber listrik DC, dan untuk menggerakkan bagian rotor motor disuplai oleh sumber listrik AC tiga fasa. Motor BLDC memiliki dua bagian yaitu rotor adalah bagian yang bergerak dan stator yaitu bagian yang diam[4]. Kelebihan menggunakan motor BLDC dibandingkan dengan motor DC konvensional yaitu memiliki kecepatan dan torsi motor yang besar, efisiensi tinggi, pengaturan kecepatan mudah, masa operasi tinggi, perawatan motor murah, serta kebisingan yang dihasilkan rendah karena putaran motor halus[5][6][7].

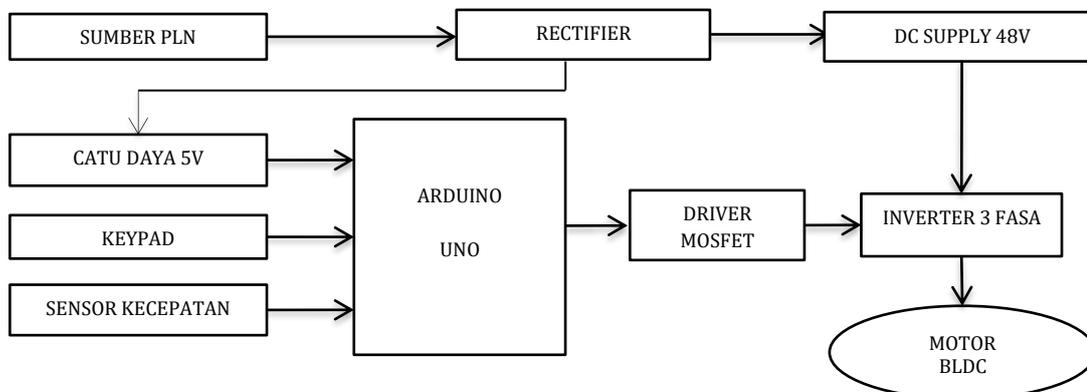
Motor BLDC memerlukan sistem kontrol agar dapat bekerja dengan baik untuk mengendalikan kecepatan putaran motor sesuai yang diinginkan. Sistem kendali kecepatan motor BLDC menggunakan Inverter tiga fasa untuk pensaklaran yang dikontrol secara digital oleh mikrokontroler Arduino Uno. Pangaturan kecepatan Motor BLDC menggunakan sinyal PWM untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda dimana nilai *duty cycle* dapat diatur nilainya sesuai dengan kebutuhan sistem[3]. *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan teknik memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam satu perioda dan frekuensi yang sama, untuk mendapatkan nilai tegangan rata-rata yang berbeda dimana nilai *duty cycle* dari gelombang kotak tersebut dapat diatur nilainya sesuai dengan kebutuhan sistem [8]. Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk merancang suatu sistem yang dapat mengendalikan kecepatan motor BLDC pada saat pengujian tanpa beban dan berbeban.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini melakukan perancangan kendali kecepatan motor BLDC menggunakan teknik kontrol PWM dengan menggunakan Arduino Uno sebagai kontroler.

A. Diagram Blok

Blok diagram adalah sistem kontrol yang akan dirancang untuk kendali kecepatan motor BLDC. Gambar 1 merupakan Blok diagram dari Tugas Akhir ini.

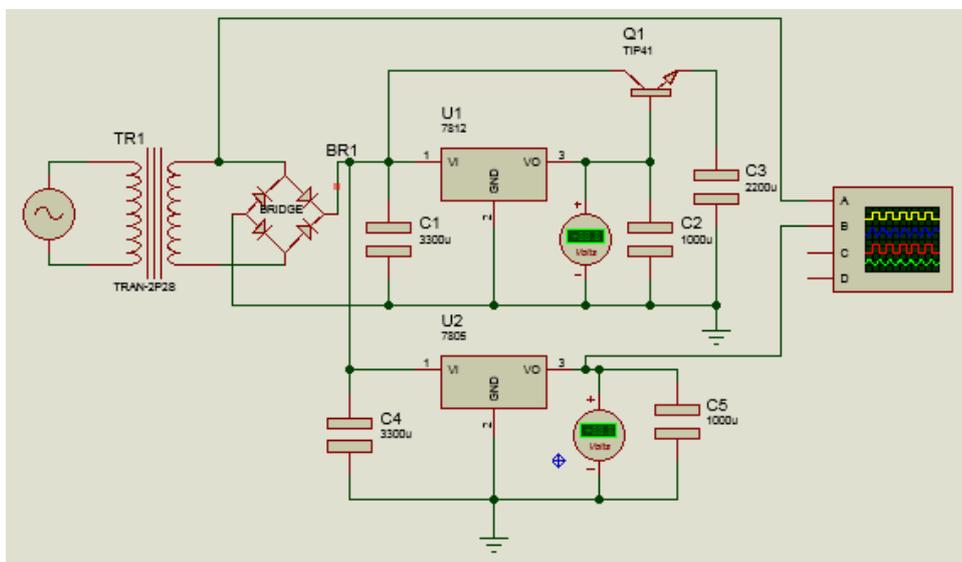


Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Berdasarkan Gambar 1, fungsi masing-masing blok sebagai berikut.

1. Catu Daya 5V

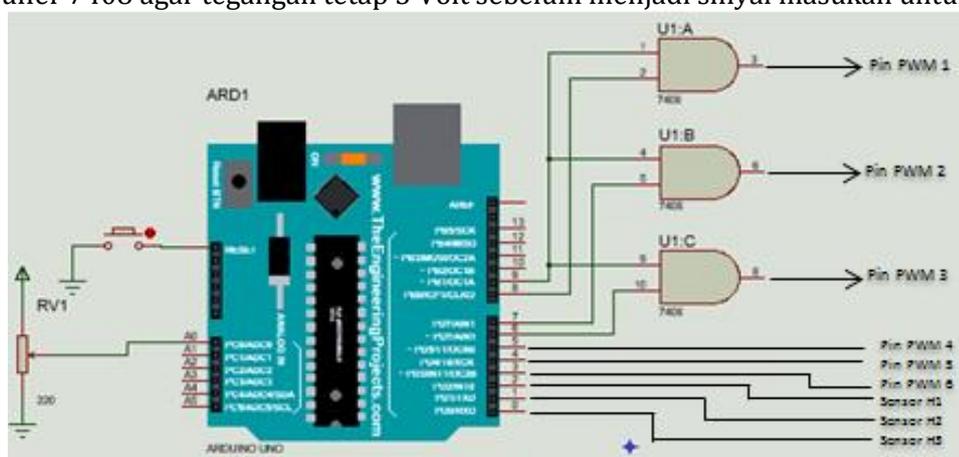
Rangkaian catu daya yang ditunjukkan gambar 3 berfungsi untuk menurunkan tegangan dari sumber PLN 220 VAC menghasilkan tegangan 5 VDC dan 12 VDC. Prinsip kerja yaitu, tegangan sumber 220 Volt AC diturunkan menggunakan ransformator *step down* yang selanjutnya gelombang disearahkan menggunakan dioda *bridge* sehingga menghasilkan tegangan Volt DC. Untuk menghilangkan noise yang didapat dari penyearah, selanjutnya arus melewati kapasitor sebagai filter untuk menghilangkan riak tegangan, selanjutnya arus menuju IC regulator untuk penstabil tegangan. Rangkaian ini menggunakan IC LM7812 untuk tegangan 12 Volt DC dan LM7805 untuk tegangan 5 Volt DC.



Gambar 2. Rangkaian Catu Daya

2. Arduino Uno

Rduino UNO adalah *board* yang menggunakan IC Mikrokontroler Atmega328[9], ATmega 328 adalah papan rangkaian sistem minimum yang menggunakan IC Atmega dan bersifat open source. Untuk pemograman menggunakan software Arduino IDE (Integrated Development Environment) dengan library C/ C++.[10] Berfungsi untuk mengendalikan Inverter 3 Fasa untuk mengatur PWM (*Pulse Width Modulation*). Arduino uno membutuhkan sumber tegangan 5 VDC dari rangkaian catu daya. Sinyal keluaran mikrokontroler selanjutnya menuju buffer 7408 agar tegangan tetap 5 Volt sebelum menjadi sinyal masukan untuk driver.



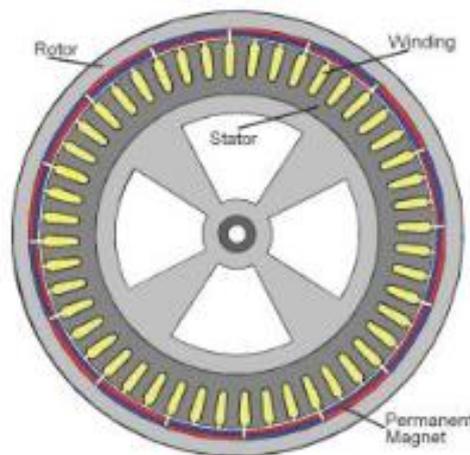
Gambar 3. Skema Perancangan Mikrokontroler Arduino Uno

3. Keypad

Berfungsi untuk memberikan nilai ADC yang nantinya akan dikonversi menjadi nilai PWM sehingga dapat merubah tegangan output pada inverter yang dapat merubah kecepatan motor BLDC.

4. Motor BLDC

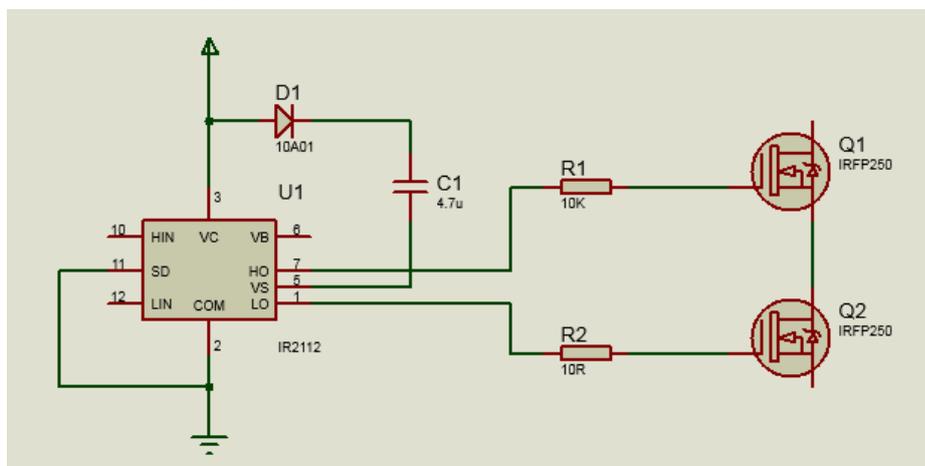
Motor BLDC adalah motor listrik *synchronous* AC 3 fasa yang mempunyai dua bagian, yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak, tersusun dari magnet permanen sedangkan stator adalah bagian yang diam dan terbuat dari kumparan 3 fasa[11]. Motor BLDC merupakan motor sinkron magnet permanen yang disuplai sumber listrik DC untuk kontrolnya, dan untuk menggerakkan bagian rotor motor disuplai oleh sumber listrik AC tiga fasa[4][12]. Konstruksi motor BLDC dilihat pada gambar 4 dibawah.



Gambar 4. Konstruksi Motor BLDC

5. Driver IR2110

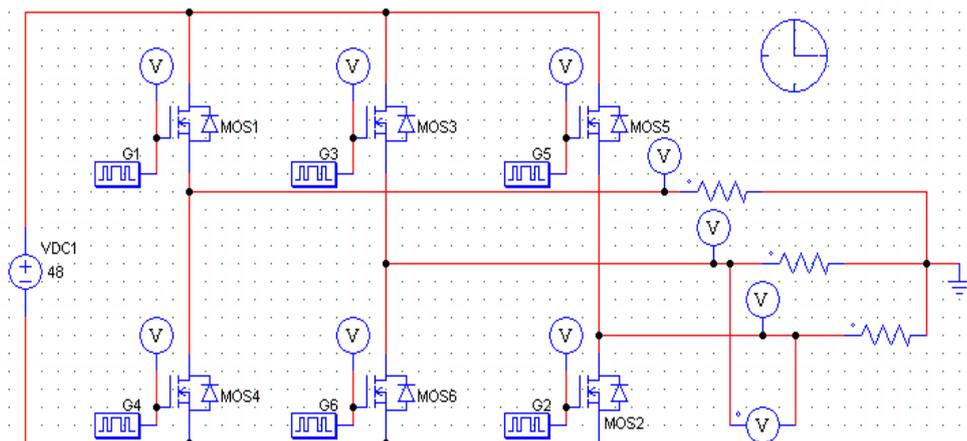
Driver berfungsi sebagai penggerak bagi Inverter 3 Fasa agar dapat bekerja. Rangkaian Driver merupakan rangkaian isolasi antara rangkaian daya berupa Inverter 3 fasa dengan rangkaian kontrol berupa mikrokontroler Arduino. Rangkaian driver berfungsi agar tidak terjadi *short* tegangan antara rangkaian daya dengan rangkaian kontrol. Pada tugas akhir ini menggunakan driver IC IR2110.



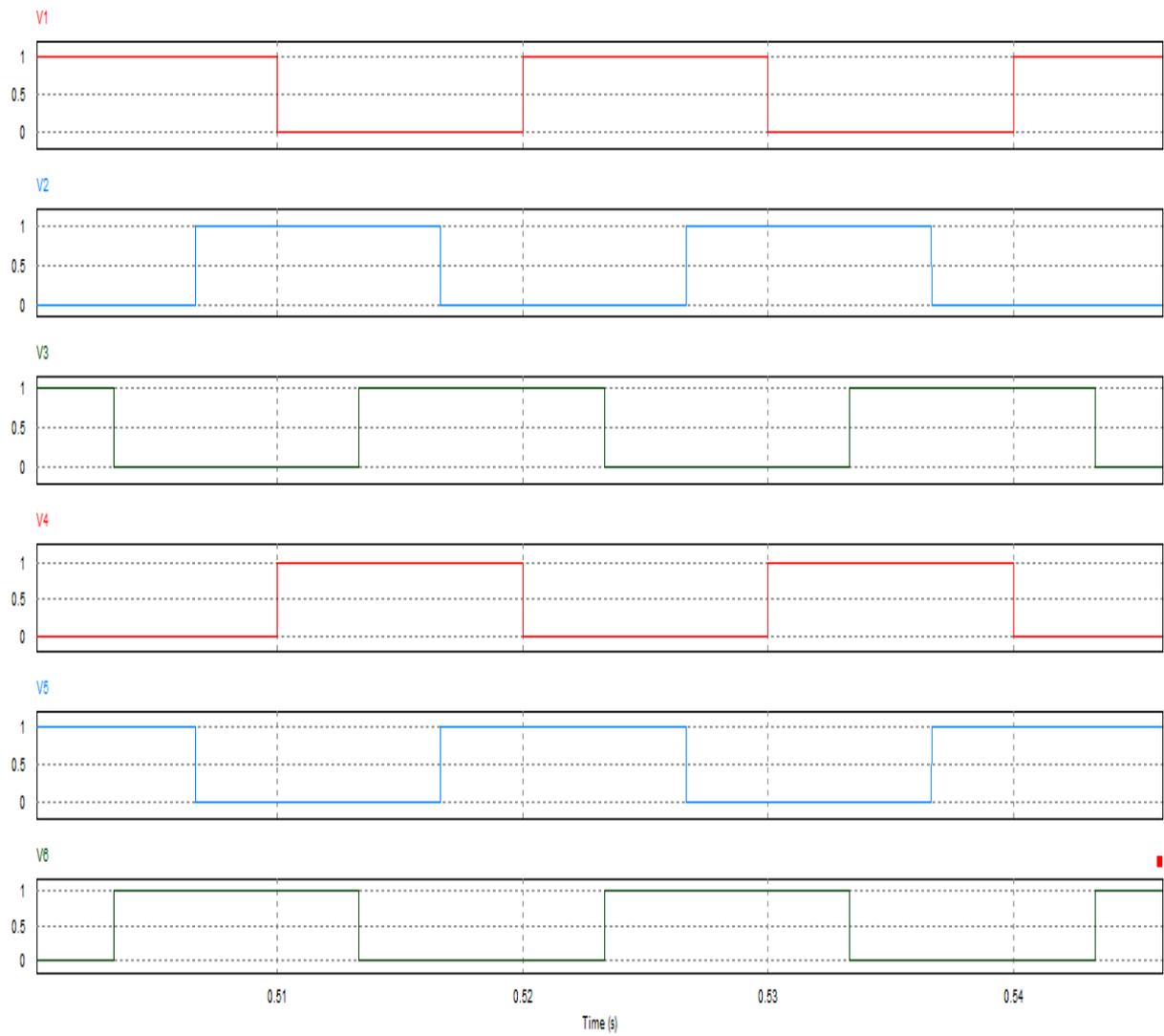
Gambar 5. Sistim Minimum IC IR2110

6. Inverter 3 Fasa

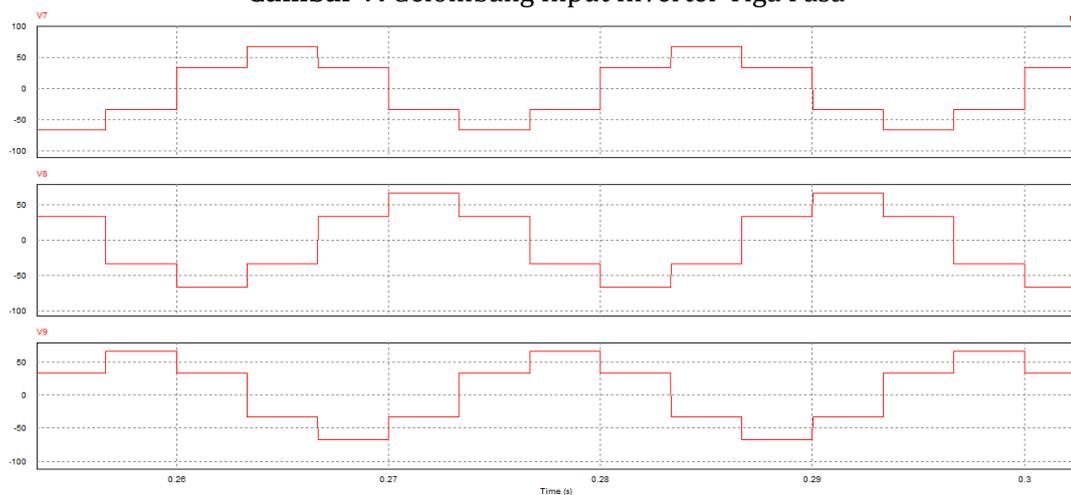
Berfungsi sebagai *switching* untuk mengatur kumparan yang akan dihidupkan. Rangkaian inverter berfungsi mengubah DC menjadi AC, dimana nilai tegangan dan frekuensi keluaran dapat diatur sesuai yang dibutuhkan sistem[13]. komponen saklar daya membutuhkan sinyal PWM untuk mencacah gelombang DC dari catu daya sehingga akan membentuk gelombang AC 3 fasa untuk memutar motor BLDC[6].Rangkaian Inverter 3 Fasa ditunjukkan gambar 6 yang dirancang menggunakan enam buah MOSFET *type* IRFP250.



Gambar 6. Rangkaian Inverter Tiga Fasa



Gambar 7. Gelombang Input Inverter Tiga Fasa



Gambar 8. Gelombang Output Inverter Tiga Fasa

7. PWM (Pulse Width Modulation)

PWM adalah teknik memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda. PWM adalah metode untuk mendapatkan tegangan keluaran bervariasi pada mikrokontroler dengan mengatur nilai lebar pulsa *high (duty cycle)*[14].

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (2)$$

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (3)$$

Keterangan:

T_{on} = Tegangan (V)

T_{off} = Arus (A)

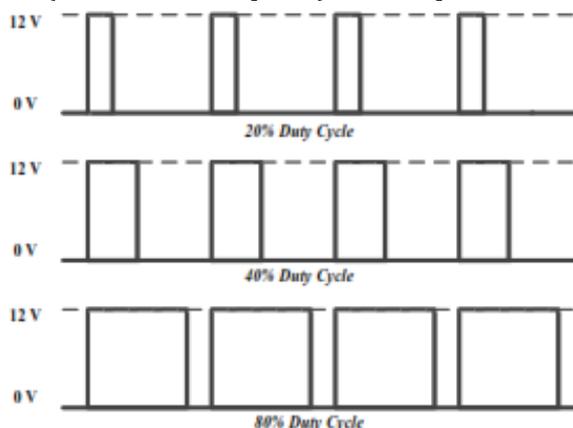
T_{total} = Hambatan (Ω)

D = *Duty Cycle*

V_{out} = tegangan Output (V)

V_{in} = tegangan input (V)

Mengatur *duty cycle* (modulasi lebar pulsa) terlihat pada Gambar 9 dibawah.



Gambar 9. Duty Cycle

Gambar 7 menunjukkan contoh sinyal PWM dengan siklus kerja PWM pada 20% *duty cycle*, 40% *duty cycle*, dan 80% *duty cycle* dengan tegangan input 12V.

Dalam pembuatan hardware, peneliti merancang desain semaksimal mungkin agar dapat bekerja dengan baik ketika dioperasikan sehingga menghasilkan output sesuai dengan tujuan dari tugas akhir yang dibuat. Dalam tahap pengujian, terdapat error yang mungkin terjadi yang timbul dari masing – masing komponen saat dioperasikan tersebut[15]. Cara menghitung error dan persentase error :

$$\text{Error} = |X_i - X_p| \quad (4)$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{X_i - X_p}{X_p} \right| \times 100\% \quad (5)$$

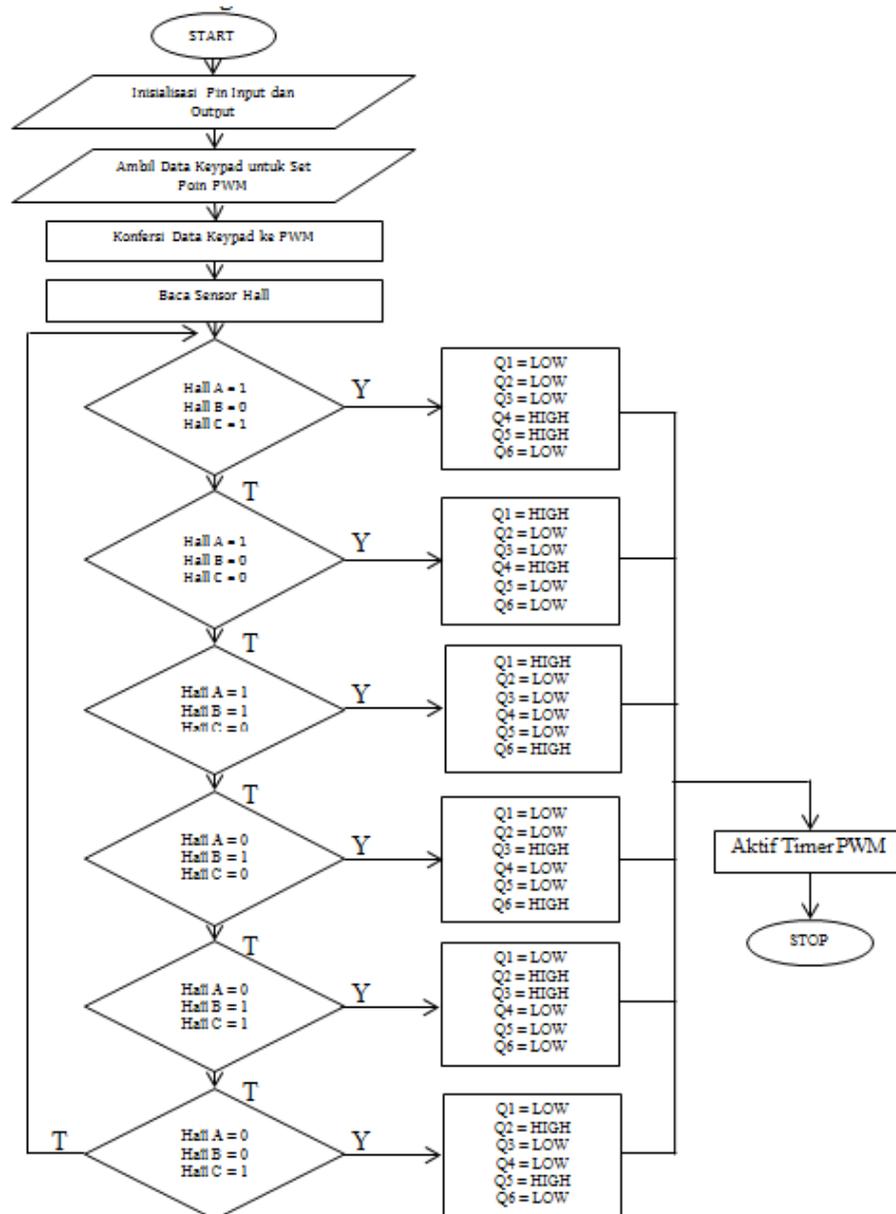
Keterangan :

X_i = Nilai pengukuran pada kontroler.

X_p = Nilai pengukuran pada alat ukur.

B. Diagram Alir (*Flowchart*)

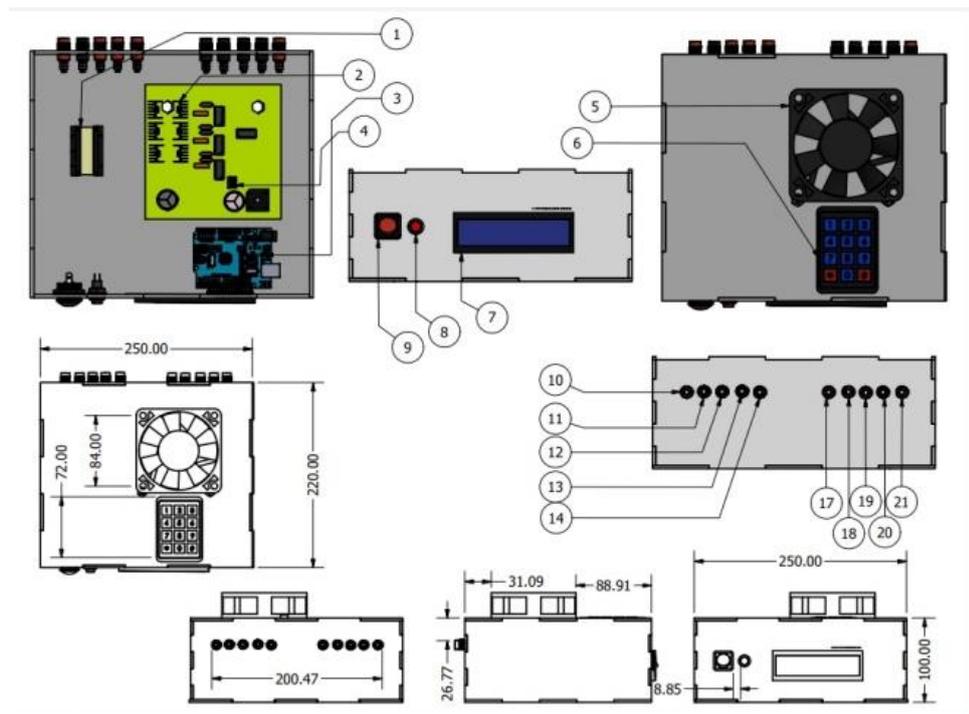
Flowchart adalah diagram alir yang mengilustrasikan alur atau urutan proses kerja suatu alat yang berfungsi sebagai acuan dalam membuat listing program. Gambar 10 adalah Rancangan *flowchart* sistem.



Gambar 10. Flowchart Sistem

C. Perancangan Hardware

Gambar 8 dibawah menunjukkan desain dari *box* alat yang berfungsi sebagai tempat penggabungan peralatan-peralatan yang sudah dirakit seperti catu daya, mikrokontroler, gate drive, konverter boost, inverter dan peralatan-peralatan lainnya. Perancangan *hardware* ini terdiri dari pembuatan *box controller* yang dirancang dengan menggunakan bahan akrilik berbentuk persegi panjang dengan ukuran *box* 25x22x10 dalam *centimeter*.



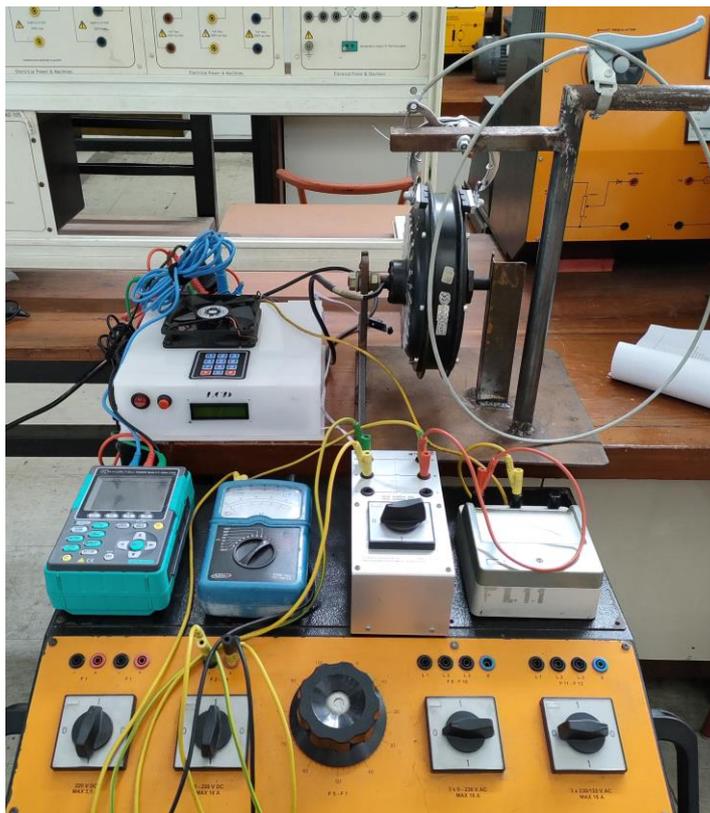
Gambar 11. Perancangan Box Alat

Keterangan :

1. Catu Daya
2. Inverter Tiga Fasa
3. Gate Driver
4. Arduino Uno
5. Kipas
6. Keypad
7. LCD 16x2
8. Reset Push Button
9. On/Off Switch
10. Sumber positif tegangan masukan 5 VDC
11. Sumber Negatif tegangan masukan 5 VDC
12. Input a *hall sensor* motor BLDC
13. Input b *hall sensor* motor BLDC
14. Input c *hall sensor* motor BLDC
15. Output fasa R motor BLDC
16. Output fasa S motor BLDC
17. Output fasa T motor BLDC
18. Sumber positif tegangan masukan 48 VDC
19. Sumber Negatif tegangan masukan 48 VDC

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi yaitu pengujian motor BLDC tanpa beban dan pengujian dengan beban rem mekanik. Tujuan pengujian yaitu mendapatkan data hasil penelitian dan menunjukkan bahwa perancangan perangkat keras yang dibuat bisa beroperasi dengan baik sehingga dapat digabungkan dengan perangkat lunak.



Gambar 12. Implementasi Pengujian Alat

1. Pengujian Motor BLDC Tanpa Beban

Pengujian motor BLDC dalam keadaan tanpa beban dilakukan dengan cara memberikan nilai set poin PWM dan tegangan input yang bervariasi seperti Tabel dibawah.

Tabel 1. Pengukuran dengan Tegangan 40V

No	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	Iin (A)	Iout (A)	Vout		Rpm
					L-N	L-L	
1	40	120	1.6	1.22	9.1	17,22	244
2	40	150	2.6	2.77	10.4	22,77	293
3	40	180	3.4	3.99	13.6	26,99	308
4	40	210	4.6	4.42	15.4	31.42	315
5	40	240	5.6	5.92	17.7	35.92	321

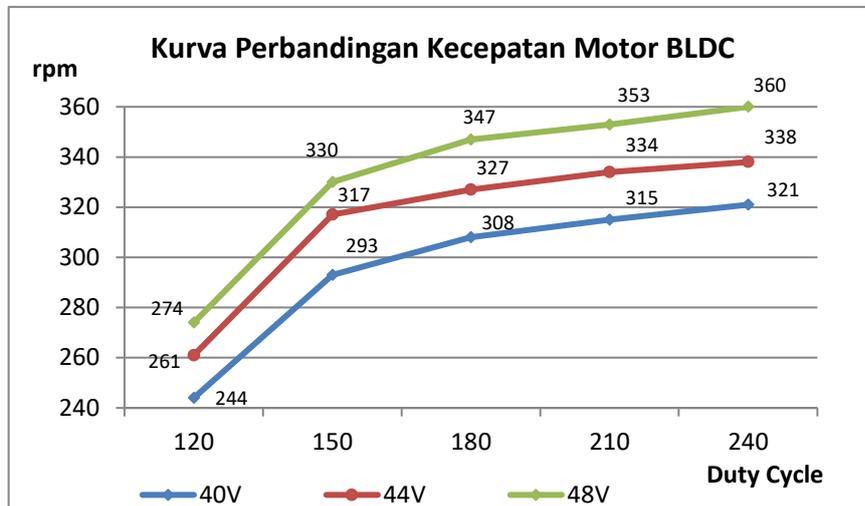
Tabel 2. Pengukuran dengan Tegangan 44V

No	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	Iin (A)	Iout (A)	Vout		Rpm
					L-N	L-L	
1	44	120	1.8	2.12	10.1	19,21	261
2	44	150	2.8	3.27	12.3	25,76	317
3	44	180	4.4	5.29	15.9	31,32	327
4	44	210	5.8	6.62	17.2	35.26	334
5	44	240	6.6	7.42	19.5	39.12	338

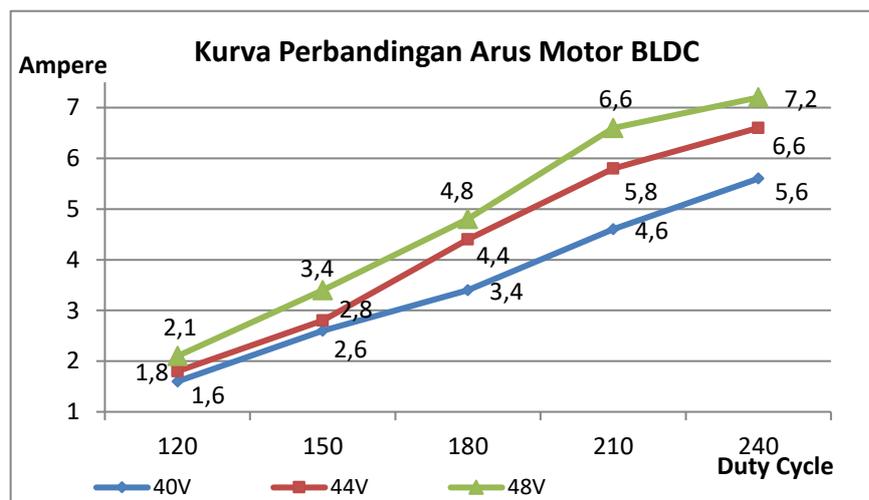
Tabel 3. Pengukuran dengan Tegangan 48V

No	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	Iin (A)	Iout (A)	Vout		Rpm
					L-N	L-L	
1	48	120	2.1	3.16	11.7	22,59	274

2	48	150	3.4	4.39	14.2	27,22	330
3	48	180	4.8	6.12	16.9	32,50	347
4	48	210	6.4	7.50	18.2	36.95	353
5	48	240	7.2	8.36	20.1	41.36	360



Gambar 13. Kurva Perbandingan Kecepatan Motor BLDC



Gambar 14. Kurva Perbandingan Arus Motor BLDC

Analisis Data :

Pengukuran diatas merupakan pengambilan data motor tanpa beban dengan tegangan dan *duty cycle* yang bervariasi. Hasil uji rangkaian pada gambar 13 menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai *set poin* PWM maka nilai rpm motor akan semakin tinggi atau kecepatan motor akan bertambah dengan nilai tegangan yang sama.

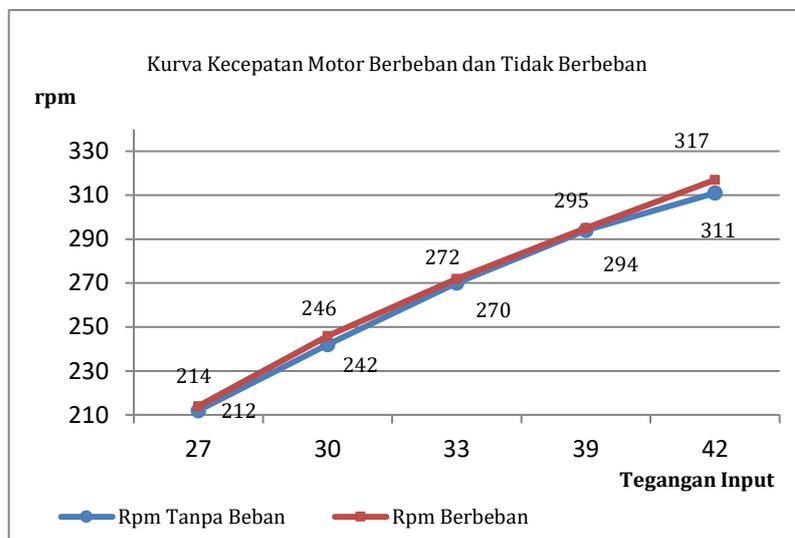
Berdasarkan hasil uji rangkaian gambar 14 menunjukkan bahwa kendali kecepatan motor BLDC menggunakan PWM adalah dengan mengendalikan nilai *duty cycle*. Penambahan nilai *duty cycle* dapat mempengaruhi nilai tegangan motor. Semakin tinggi nilai *duty cycle*, maka nilai tegangan juga akan meningkat. Ketika nilai tegangan meningkat, maka nilai arus juga akan meningkat. Arus sebanding dengan kecepatan pada motor sehingga kecepatan motor juga akan meningkat. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan tegangan dan arus berbanding lurus dengan rpm motor.

2. Pengujian Motor BLDC Berbeban

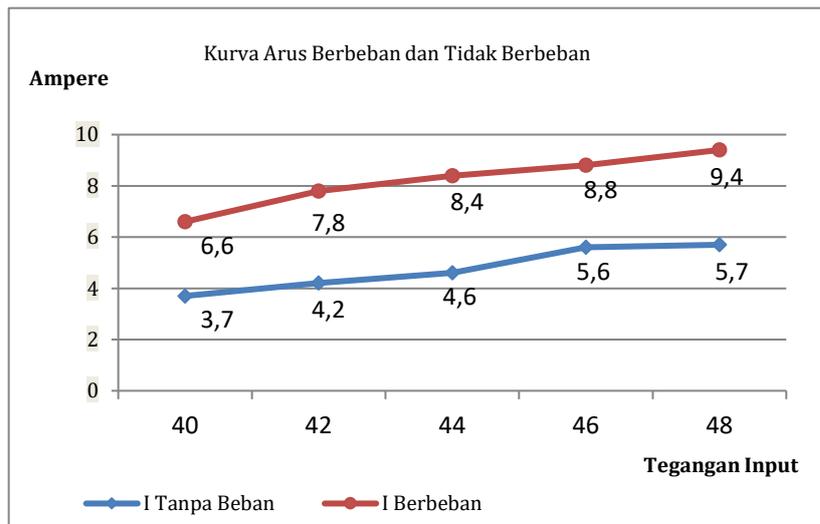
Pengujian motor BLDC dalam keadaan berbeban akan mempengaruhi kecepatan putaran motor BLDC yang nantinya akan dilakukan pengkonstanan kecepatan dengan dua cara yaitu dengan menaikkan tegangan input dan duty cycle.

Tabel 4. Pengkonstanan Kecepatan Motor BLDC dengan Menaikkan Tegangan Input

NO	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	n Rpm	n Rpm Berbeban	Iin (A)	I Berbeban (A)	V Tambahan (Volt)
1	27	250	212	214	3.7	6.6	5V (32V)
2	30	250	242	246	4.2	7.8	6V (36V)
3	33	250	270	272	4.6	8.4	7V (40V)
4	39	250	294	295	5.6	8.8	5V (44V)
5	42	250	311	317	5.7	9.4	6V (48V)



Gambar 15. Kurfa Kecepatan Motor Berbeban dan Tidak Berbeban



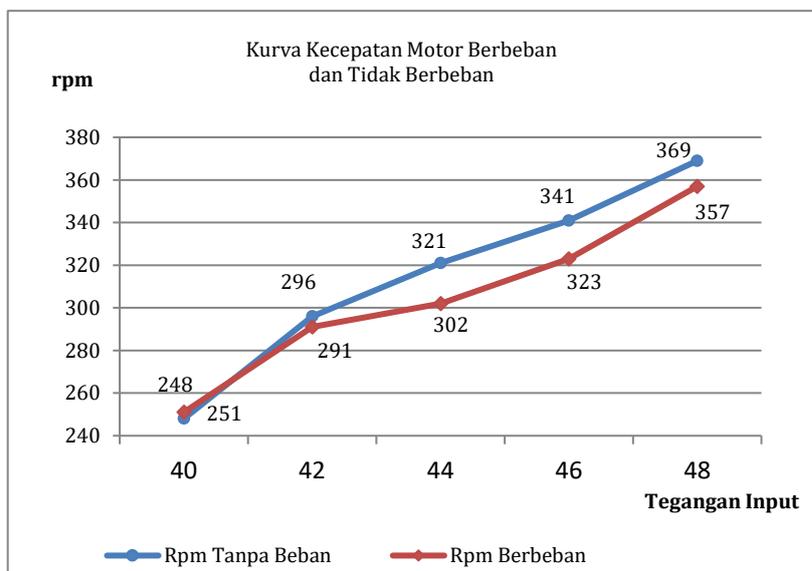
Gambar 16. Kurfa Arus Motor Berbeban dan Tidak Berbeban

Analisis Data :

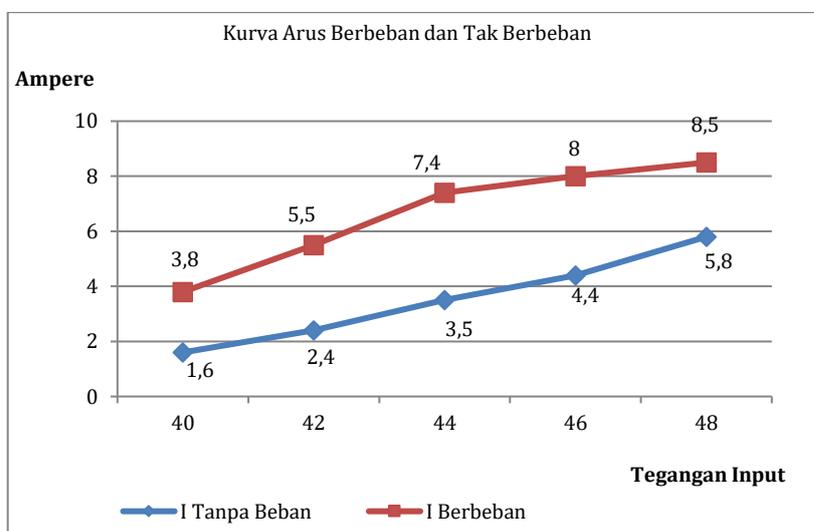
Berdasarkan tabel 6, gambar kurva 15 dan gambar kurva 16, hasil uji rangkaian pada saat motor diberi beban menunjukkan bahwa, arus pada saat berbeban meningkat dikarenakan adanya beban pada motor yang menyebabkan kecepatan putaran motor berkurang, untuk mengembalikan putaran motor kembali kepada kecepatan pada saat tanpa beban yaitu dengan penambahan nilai tegangan input sampai dengan kecepatan motor kembali ke putaran awal pada saat sebelum berbeban.

Tabel 5. Pengkonstanan Kecepatan Motor BLDC dengan Mengatur nilai Duty Cycle

NO	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	n rpm	n rpm Berbeban	Iin (A)	I Berbeban (A)	PWM Tambahan (Duty Cycle)
1	40	120	248	251	1.6	3.8	30 (150)
2	42	140	296	291	2.4	5.5	40 (180)
3	44	160	321	302	3.5	7.4	40 (200)
4	46	180	341	323	4.4	8.0	40 (220)
5	48	200	369	357	5.8	8.5	50 (250)



Gambar 17. Kurva Kecepatan Motor Berbeban dan Tidak Berbeban



Gambar 18. Kurva Arus Berbeban dan Tak Berbeban

Analisis Data :

Berdasarkan tabel 7, gambar kurva 17 dan gambar kurva 18, hasil uji rangkaian pada saat motor diberi beban menunjukkan bahwa, arus pada saat berbeban meningkat dikarenakan adanya beban pada motor yang menyebabkan kecepatan putaran motor berkurang, untuk mengembalikan putaran motor kembali kepada kecepatan pada saat tanpa beban yaitu dengan mengendalikan nilai *duty cycle* sampai dengan kecepatan motor kembali ke putaran awal pada saat sebelum berbeban. Penambahan nilai *duty cycle* dapat mempengaruhi nilai tegangan motor, semakin tinggi nilai *duty cycle*, maka nilai tegangan juga akan meningkat. ketika nilai tegangan meningkat, maka nilai arus juga akan meningkat. Arus sebanding dengan putaran rpm pada motor sehingga putaran motor juga akan meningkat.

3. Pengujian Sensor Kecepatan

Pengujian alat ini dilakukan untuk membandingkan hasil pengukuran kecepatan pada sensor tegangan dengan kecepatan yang terukur menggunakan tachometer seperti gambar 19 dibawah.



Gambar 19. Pengukuran Kecepatan RPM Motor dengan Tachometer

Pengujian tugas akhir ini menggunakan sensor infra red sebagai sensor kecepatan yang mengirim data hasil pembacaan sensor ke arduino uno untuk ditampilkan ke LCD.

Tabel 6. Pengujian Sensor Kecepatan

NO	Vin (Volt)	Set PWM (Duty Cycle)	Sensor Kecepatan (rpm)	Alat Ukur Kecepatan (rpm)	Selisih	Error %
1	40	120	248	253	5	1.98%
2	42	140	296	297	1	0.34%
3	44	160	321	322	1	0.31%
4	46	180	341	342	1	0.29%
5	48	200	369	371	2	0.54%

Pada pengujian kali ini terdapat perbedaan antara pembacaan kecepatan sensor tegangan dengan kecepatan yang terukur menggunakan tachometer, kejadian ini disebut dengan *error*. Nilai *error* pengukuran sensor kecepatan sebagai berikut.

$$1. \%Error = \frac{Rpm (alat ukur) - Rpm (sensor)}{Rpm (alat ukur)} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} &= \frac{253-248}{253} \times 100\% \\ &= \frac{5}{253} \times 100\% \\ &= 1.98\% \end{aligned}$$

2. $\%Error = \frac{Rpm \text{ (alat ukur)} - Rpm \text{ (sensor)}}{Rpm \text{ (alat ukur)}} \times 100\%$

$$\begin{aligned} &= \frac{297-296}{297} \times 100\% \\ &= \frac{1}{297} \times 100\% \\ &= 0.34\% \end{aligned}$$

3. $\%Error = \frac{Rpm \text{ (alat ukur)} - Rpm \text{ (sensor)}}{Rpm \text{ (alat ukur)}} \times 100\%$

$$\begin{aligned} &= \frac{322-321}{322} \times 100\% \\ &= \frac{1}{322} \times 100\% \\ &= 0.31\% \end{aligned}$$

4. $\%Error = \frac{Rpm \text{ (alat ukur)} - Rpm \text{ (sensor)}}{Rpm \text{ (alat ukur)}} \times 100\%$

$$\begin{aligned} &= \frac{342-341}{341} \times 100\% \\ &= \frac{1}{341} \times 100\% \\ &= 0.29\% \end{aligned}$$

5. $\%Error = \frac{Rpm \text{ (alat ukur)} - Rpm \text{ (sensor)}}{Rpm \text{ (alat ukur)}} \times 100\%$

$$\begin{aligned} &= \frac{371-369}{371} \times 100\% \\ &= \frac{2}{371} \times 100\% \\ &= 0.54\% \end{aligned}$$

Analisa :

Hasil data yang ditunjukkan tabel 8, dapat dilihat *error* pengukuran paling tinggi adalah dengan *error* 1.98% dan rata-rata *error* yaitu 0.69%. maka disimpulkan bahwa sensor kecepatan terakhir ini dapat bekerja dengan sangat baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji rangkaian dan analisa dapat diambil kesimpulan bahwa tugas akhir kendali kecepatan motor BLDC yang dibuat dapat bekerja dengan baik. Pengguna dapat mengendalikan kecepatan motor BLDC dengan cara mengatur PWM yaitu dengan mengatur nilai *duty cycle* yang akan mempengaruhi nilai tegangan. Ketika nilai tegangan meningkat maka nilai arus pada motor BLDC juga akan meningkat, sehingga putaran pada motor BLDC akan meningkat karena arus berbanding lurus dengan kecepatan atau torka motor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. K. Sari, W. Hadi, and W. Cahyadi, "Analisis Motor Brushless Direct Current Aksial Fluks 3 Fasa Menggunakan Magnet Permanen Neodymium Sebagai Prime Mover Generator," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 19, no. 2, pp. 195–202, 2020.
- [2] M. Daputra and Z. Zulwisli, "Six-Step Inverter Untuk Mengendalikan Motor 3 Fasa Arus Searah Tanpa Sikat Berbasis Arduino," *Voteteknika (Vocational Tek. Elektron. dan Inform.*, vol. 7, no. 4, p. 20, 2020, doi: 10.24036/voteteknika.v7i4.106377.
- [3] D. Akbar and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation)," *Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO)*, 2018.
- [4] R. Mulyadi, K. D. Artika, and M. Khalil, "Elektronik Pada Mobil Listrik," *Jurnal Elemen*, vol. 6, no. 1, pp. 7–12, 2019.
- [5] W. A. Oktaviani and S. Basri, "Kendali Motor DC Brushless Modifikasi Menggunakan IC

-
- Ne555 Dan CD4017," *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro Kendali*, vol. 15, no. 1, pp. 20–24, 2021.
- [6] R. Dewi, "Efek Duty Cycle Pwm pada Pengendalian Kecepatan Motor BLDC 3 Fasa," *J. Electr. Power Control Autom.*, vol. 1, no. 1, p. 14, 2018, doi: 10.33087/jepca.v1i1.4.
- [7] B. Sujanarko, "Desain Kontrol PWM Pengatur Kecepatan Motor BLDC Untuk Mobil Listrik," *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi Terapan 2013 (Semantik 2013)*, vol. 2013, no. November, pp. 42–48, 2013.
- [8] T. Y. Candra and Ta'ali, "Sistem Pengendali Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbeban dengan Teknik Kontrol PWM Berbasis Arduino," *Jtev (Jurnal Tek. Elektro Dan Vokasional)*, vol. 06, no. 01, pp. 199–210, 2020.
- [9] M. I. Hafidhin, A. Saputra, Y. Ramanto, and S. Samsugi, "Alat Penjemuran Ikan Asin Berbasis Mikrokontroler Arduino UNO," *J. Tek. dan Sist. Komput.*, vol. 1, no. 2, pp. 26–33, 2020, doi: 10.33365/jtikom.v1i2.210.
- [10] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, and S. Yusuf, "Design of a Prototype D-Statcom using DSP Controller for Voltage Sag Mitigation Design of a Prototype D-Statcom for Voltage Sag Mitigation," 2005.
- [11] R. J. Andika *et al.*, "Perancangan Dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa Untuk Pengendali Kecepatan Motor Bldc Berbasis Pwm Pada Mobil Listrik," vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2018.
- [12] R. F. Anugrah, I. Diah, and B. Y. Dewantara, "Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation dengan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)," *J. Tek. Elektro dan Komput. Triac*, vol. 7, no. 2, 2020.
- [13] Sardiyanto, "Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt," *Transient*, 2003.
- [14] D. T. Arif and A. Aswardi, "Kendali Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah Berbeban Berbasis Arduino," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, p. 33, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i2.108395.
- [15] M. Monita and H. Hendri, "Sistem Kontrol Rumah Pintar Menggunakan Kamera Berbasis IoT," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 107–112, 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i1.141.