

# Sistem Pengendalian Kecepatan Dua Motor *Brushless DC* (BLDC) dengan *Nine Switch Inverter* Menggunakan Metode PWM

Charles R. Harahap<sup>1</sup>, Endah Komalasari<sup>2</sup>, Arnel Alberta Clinton<sup>3</sup>

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung  
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

<sup>1</sup>charles.harahap69@gmail.com

<sup>2</sup>endah.komalasari@eng.unila.ac.id

<sup>3</sup>arnelclinton35@gmail.com

**Intisari** — Untuk mengendalikan dua motor *brushless DC* (BLDC) umumnya memerlukan dua inverter tiga fasa dengan jumlah saklar sebanyak 12 buah yang pengendaliannya rumit dan tidak hemat. Di mana satu buah inverter tiga fasa memiliki 6 buah saklar. Dalam penelitian ini, dikembangkan suatu pengendalian kecepatan dua motor BLDC menggunakan satu buah inverter dengan sembilan saklar yang disebut dengan *nine switch inverter* dengan metode modulasi *pulse width modulation* (PWM). Proses modulasi *nine switch inverter* memerlukan modulasi PWM untuk mengendalikan frekuensi dan tegangan. Arduino digunakan untuk menghasilkan PWM dalam penelitian ini. Penggunaan *nine switch inverter* sebagai konversi sumber arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik untuk pengendalian kecepatan dua motor BLDC karena membutuhkan sumber AC untuk menggerakkan rotor motornya. Dalam pengendalian dua motor BLDC meliputi pengendalian *switching* menggunakan PWM, untuk mengatur frekuensi *input* yang kemudian didapatkan hasil pengaruh frekuensi terhadap tegangan, arus, kecepatan dua motor BLDC dan torsi. Pengujian dari pengendali ini terdiri dari kondisi motor berbeban dan tanpa beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan dua motor BLDC dapat dikendalikan secara simultan dengan *nine switch inverter* dengan mengatur frekuensi *input*.

**Kata kunci** — dua motor *brushless DC*, *nine switch inverter*, *pulse width modulation* (PWM), *Arduino* simulink *MATLAB*.

**Abstract** — Two three phase inverters which consists of 12 switches are generally required to control two brushless DC Motors, which are complicated and inefficient to control them. One inverter has 6 switches. This research develops controlling of two brushless DC Motors using nine switch inverters with Pulse Width Modulation method. Nine switch inverter needs PWM for controlling frequency and voltage. Arduino is used to generate PWM in this research. Nine switch inverters are used to convert DC voltage to AC Voltage because of BLDC needs AC Voltage to drive the rotor of motors. In controlling two BLDC Motors, it includes switching control using PWM, to adjust the input frequency which then results in the effect of frequency on the voltage, current, speed of two BLDC Motors and torque. The test of this controller consists of the condition of the motor with and without load. The test results show that the speed of two BLDC motors can be controlled simultaneously with nine switch inverters by adjusting the input frequency.

**Keywords** — two brushless DC motors, nine switch inverter, pulse width modulation (PWM), Arduino, Simulink Matlab.

## I. PENDAHULUAN

Dalam merancang suatu teknologi, dibutuhkan suatu rancangan dengan rangkaian yang sederhana dan murah tapi memberikan hasil yang baik dalam operasinya. Tujuannya agar dapat diterapkan dan menghemat biaya. Rangkaian yang rumit dan menggunakan banyak komponen membutuhkan waktu pembuatan yang lama dan biaya pembuatannya yang lebih mahal, sehingga produksi mahal dan tidak laku di pasaran. Oleh karena itu rangkaian yang rumit harus disederhanakan dan jumlah komponen

dikurangi yang menyebabkan biaya produksi dapat dikurangi namun tidak mengurangi kualitasnya sehingga dapat laku di pasaran apabila alatnya dijual.

Hal inilah yang melatarbelakangi penelitian ini. Penelitian ini memodifikasi dua buah inverter dengan dua belas saklar menjadi satu inverter dengan sembilan saklar dalam mengendalikan kecepatan dua buah motor BLDC. Dengan rangkaian yang lebih sederhana dan jumlah komponen yang tidak banyak sehingga biaya yang dibutuhkan untuk mengendalikan dua buah motor BLDC tidak begitu mahal. Teknik PWM yang dihasilkan

dari arduino tidak begitu rumit sehingga dapat diterapkan dalam pengendalian dua buah motor BLDC.

Motor *brushless* DC (BLDC) merupakan motor yang sering ditemui di dunia industri dan transportasi listrik. Motor BLDC merupakan motor tiga fasa yang berbeda dengan motor DC karena motor BLDC menggunakan kutub magnet sementara motor DC menggunakan komutator untuk dapat berputar. Motor BLDC memiliki torsi dan efisiensi yang tinggi. Untuk mengendalikan motor BLDC diperlukan perangkat elektronika daya yaitu inverter yang melakukan proses *switching* untuk membuat motor BLDC dapat bekerja secara optimal.

Penggunaan dua motor BLDC umumnya menggunakan dua buah inverter dan dua pengendali. Pengendalian dua buah motor BLDC dengan metode ini tidak hemat biaya karena menggunakan dua inverter dengan dua belas saklar dan untuk pengendaliannya memerlukan dua buah mikrokontroler [1]. Metode yang digunakan ini tidak hemat biaya karena banyak menggunakan komponen *switching* dan rumit untuk pengendaliannya karena menggunakan dua buah mikrokontroler.

Pada penelitian ini, dilakukan pengendalian dua buah motor BLDC, dengan sebuah *nine switch inverter* dan metode *pulse width modulation* (PWM) dalam mengendalikan proses *switching* [2]. *Nine switch inverter* merupakan rangkaian elektronika daya yang merubah sumber tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) dengan komponen *switching* sebanyak sembilan buah dan hanya memerlukan satu buah mikrokontroler dalam pengendaliannya, sehingga dapat mengendalikan dua motor BLDC secara bersamaan. PWM adalah metode yang digunakan untuk mengendalikan *nine switch inverter* agar dapat melakukan proses *switching* yang dihasilkan dari mikrokontroler untuk dapat mengendalikan *nine switch inverter* yang kemudian dapat membuat dua motor BLDC dapat berputar dengan kecepatannya yang dapat diatur berdasarkan frekuensi dan tegangannya.

Pada penelitian Kominami dkk,[1] menggunakan *nine switch inverter* untuk mengendalikan dua buah motor induksi, pada penelitian ini menggunakan rangkaian *nine*

*switch inverter* untuk mengendalikan dua buah motor BLDC.

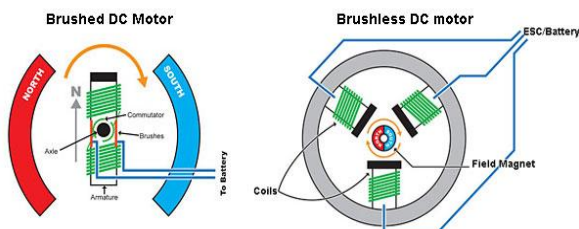
Penelitian ini menggunakan lebih sedikit saklar dengan satu buah mikrokontroler sehingga lebih hemat dalam mengendalikan dua motor BLDC.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Motor Brushless DC (BLDC)

Motor brushless DC (BLDC) merupakan motor listrik yang berputar pada kecepatan konstan mulai tanpa beban sampai beban penuh. Untuk pembangkitannya motor BLDC menggunakan sumber tiga fasa untuk membangkitkan medan magnet putar dan interferensi elektromagnetis yang disuplai dengan arus. Rotor pada motor BLDC yang memiliki magnet permanen dan bertindak seperti magnet ditarik oleh medan stator yang berputar. Penarikan oleh medan stator akan menghasilkan torsi pada rotor dan menyebabkan rotor berputar. [3]. Untuk start-up motor BLDC tidak dapat berputar sendiri dan harus berputar pada kecepatan yang mendekati kecepatan sinkron sebelum motor dapat terus berputar sendiri dengan bantuan medan DC yang diberi tenaga. Motor BLDC dapat ditemui pada mobil listrik, kereta listrik dan lain – lain.

Motor BLDC. adalah motor yang bekerja pada kecepatan tetap pada sistem frekuensi tertentu. Motor BLDC terdiri dari dua bagian yaitu rotor dan stator, rotor adalah bagian bergerak yang memiliki magnet dan stator merupakan bagian kumparan untuk menciptakan medan magnet dengan stator. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dengan bantuan inverter untuk mengubah menjadi arus bolak-balik (AC) [4]. motor BLDC memiliki kumparan magnet pada rotor, Kumparan magnet pada rotor akan mengalami magnetisasi dengan kumparan pada stator saat ada arus dan tegangan mengalir yang menyebabkan motor BLDC bergerak. Konstruksi motor BLDC dapat dilihat pada gambar 1.

Gbr. 1 Motor *Brushless* DC (BLDC)

Motor BLDC memiliki kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Kumparan jangkar memiliki bentuk sama seperti mesin induksi, sedangkan kumparan medan mesin sinkron dapat berbentuk seperti kutub sepatu (*salient*) atau kutub udara dengan celah sama rata (rotor silinder). Arus searah (DC) berfungsi untuk menghasilkan fluks pada kumparan medan dialirkan ke rotor melalui cincin [5].

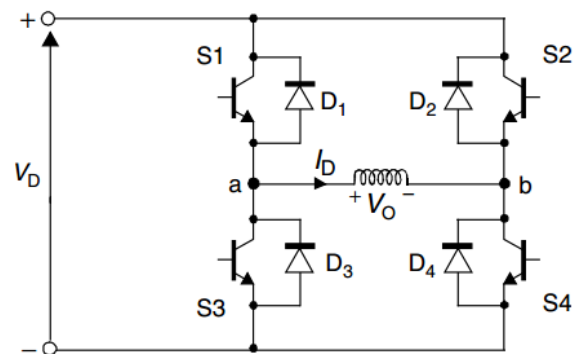
Motor *brushless* DC (BLDC) biasanya digunakan untuk performa tinggi dan efisiensinya tinggi. Motor dengan performa tinggi dapat dilihat dengan putaran yang halus dan control akselerasi dan deselerasi yang mudah. Dengan adanya magnet pada rotor dan kumparan stator yang menimbulkan medan magnet untuk menggerakkan motor sinkron magnet permanen. Pengendalian kecepatan motor *brushless* DC (BLDC) memerlukan proses *switching* dengan bantuan inverter. Proses *switching* dapat dilakukan dengan merubah modulasi lebar pulsa pada PWM [6].

### B. Inverter

Inverter adalah suatu peralatan elektronika daya yang digunakan untuk mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan AC. Inverter seringkali disebut sebagai variable speed drive (VSD) atau variable frequency drive (VFD). Prinsip kerja dari inverter adalah mengubah sumber tegangan DC menjadi AC dengan frekuensi yang telah dirubah sehingga motor dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan yang diinginkan dengan menggunakan PWM [7]. Komponen yang digunakan pada inverter dapat berupa SCR, transistor, dan MOSFET yang beroperasi sebagai sakelar dan pengubah.

Dalam dunia industri, inverter merupakan alat atau perangkat elektronika daya yang berfungsi sebagai *switching* untuk mengatur kecepatan motor listrik dengan mengatur sinyal pada PWM. Dengan menggunakan inverter motor listrik menjadi *variable speed*,

yaitu kecepatannya dapat diubah atau diatur sesuai dengan kebutuhan. Proses di industri seringkali memerlukan tenaga penggerak motor listrik kecepatan putarnya perlu diatur untuk menghasilkan torsi dan tenaga yang diinginkan.

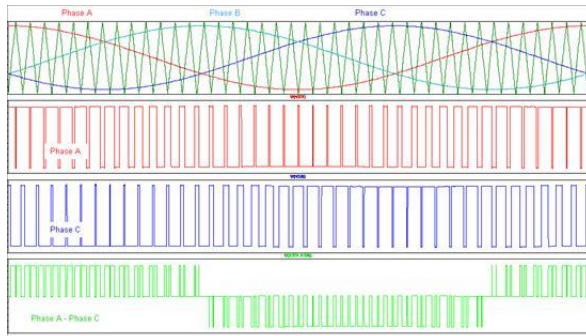


Gbr. 2 Rangkaian Inverter

### C. Pulse Width Modulation (PWM)

PWM adalah kepanjangan dari *Pulse Width Modulation* atau dalam bahasa Indonesia adalah Modulasi Lebar Pulsa. Pada dasarnya, PWM adalah suatu teknik modulasi yang mengubah lebar pulsa (*pulse width*) dengan nilai frekuensi dan amplitudo yang tetap [9]. PWM dapat dianggap sebagai kebalikan dari ADC (*Analog to Digital Converter*) yang mengkonversi sinyal Analog ke Digital, PWM atau *Pulse Width Modulation* ini digunakan untuk menghasilkan sinyal analog dari perangkat Digital (contohnya dari Mikrokontroler).

PWM dapat ditemukan fungsinya pada Arduino, salah satu teknik modulasinya adalah dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. Satu siklus pulsa merupakan kondisi *high* kemudian berada di zona transisi ke kondisi *low*. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi [8]. *Duty cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk (%) dengan range 0% sampai 100% sebagai contoh jika sinyal terus berada dalam kondisi *high* terus menerus artinya memiliki *duty cycle* sebesar 50%, bentuk *output* gelombang sinyal PWM dapat dilihat pada gambar 3.



Gbr. 3 Pulse Width Modulation (PWM)

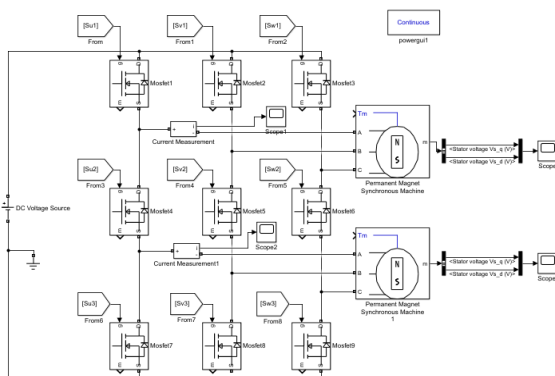
### III. METODE PENELITIAN

#### A. Perancangan prototype dan coding arduino

Perancangan prototype ini dilakukan dengan membuat *nine switch inverter* dan PWM. Berikut adalah beberapa tahapan yang akan dilakukan pada perancangan *prototype* ini, yaitu pembuatan desain rangkaian *nine switch inverter* dan PWM pada arduino IDE. Membuat rancangan dua motor BLDC yang dihubungkan ke *nine switch inverter*. Rancang bangun *nine switch inverter* kemudian dihubungkan dengan arduino kemudian dianalisa menggunakan osiloskop untuk mengetahui gelombang output untuk mengatur kecepatan dua motor *brushless DC* (BLDC).

#### B. Nine Switch Inverter

Pengendalian dua motor BLDC memerlukan inverter sebagai *switch* dengan PWM sebagai modulasinya. *Nine switch inverter* memiliki kelebihan karena menghemat penggunaan *switch* (MOSFET) sehingga dapat mengurangi biaya dalam pemakaian *switch* dan juga dapat mengurangi kerugian energi [9]. *Nine switch inverter* dapat bekerja dengan menggunakan modulasi lebar pulsa gelombang yang dapat diubah-ubah melalui PWM.

Gbr. 4 Rangkaian *nine switch inverter*

Prinsip kerja *nine switch inverter*, *switch* pada bagian atas Su1, Sv1 dan Sw1 bekerja dengan referensi sinyal gelombang atas pada simulasi, sementara untuk Su3, Sv3 dan Sw3 bekerja dengan referensi sinyal gelombang bawah pada simulasi. *Switch* di bagian tengah Su2, Sv2 dan Sw3 merupakan jembatan sinyal yang berfungsi untuk proses *switching* pada rangkaian *switch* di atas dan bawah [10]. *Switch* di bagian tengah bekerja sebagai penghubung antara bagian atas dan bagian bawah atau disebut sebagai gerbang XOR selama terjadinya proses *switching*. Proses pensaklaran *switching* yang dibuat pada arduino IDE dapat dilihat pada tabel 1 pensaklaran berikut.

Tabel 1. Kondisi mosfet setiap kaki pada *nine switch inverter*

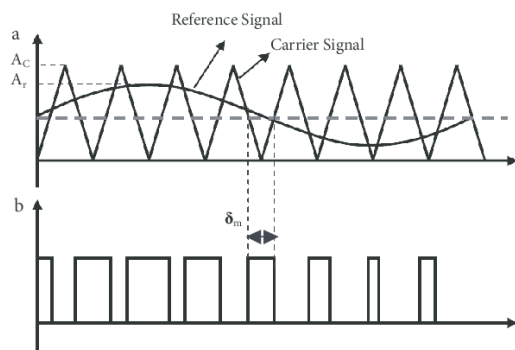
No	Saklar				
	Saklar	R	Y	B	
1	H	0	0	0	Initiate
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	
2	H	1	1	0	Upper Inverter Work
	M	0	0	1	
	L	1	1	1	
3	H	1	0	0	
	M	0	1	1	
	L	1	1	1	
4	H	1	1	0	
	M	0	0	1	
	L	1	1	1	
5	H	0	0	0	Loop
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	
6	H	1	1	1	Lower Inverter Work
	M	1	0	0	
	L	0	1	1	
7	H	1	1	1	
	M	1	1	0	
	L	0	0	1	
8	H	1	1	1	
	M	1	0	0	
	L	0	1	1	
9	H	0	0	0	Loop
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	



### C. Pulse Width Modulation (PWM)

*Pulse width modulation* (PWM) adalah sebuah metode modulasi lebar pulsa sinyal PWM dengan mengubah arah sudut dan tegangan pada keluaran sinyal PWM membandingkan sinyal referensi dan sinyal *carrier* dengan gelombang kotak menuju gate driver dengan menggunakan sistem *ON* dan *OFF*. Sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100%. Kondisi *ON* terjadi saat tegangan 5V dan kondisi *OFF* terjadi saat tegangan 0V [11].

Kontrol PWM dapat dilakukan dengan menggunakan program *coding* arduino, dengan membuat program pada arduino IDE yang menentukan arah sudut dan mengatur tegangan yang kemudian di lihat hasil dari simulasi gelombang pulsa pada osiloskop. Hasil dari gelombang PWM akan di *input* ke mikrokontroler Arduino untuk dapat melakukan proses *switching nine switch inverter* yang akan menggerakkan dua motor BLDC.

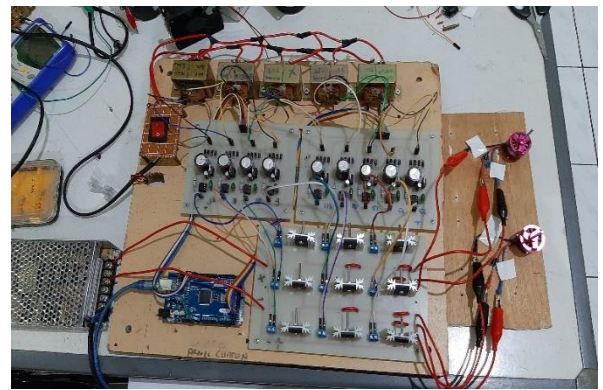


Gbr. 5 Gelombang PWM

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Rancang Bangun Nine Switch Inverter

Suatu inverter tiga fasa dengan sembilan *switch* dirancang untuk mengendalikan dua motor BLDC secara paralel. Rangkaian *nine switch inverter* terdiri dari rangkaian arduino yang berfungsi untuk pembangkitan sinyal PWM melalui mikrokontroler arduino dengan mengatur *duty cycle* PWM yang kemudian dikirimkan ke *gate driver* untuk dapat melakukan pembangkitan pada *nine switch inverter* untuk melakukan *switching* dan berfungsi untuk meningkatkan tegangan dari arduino ke *nine switch inverter*.

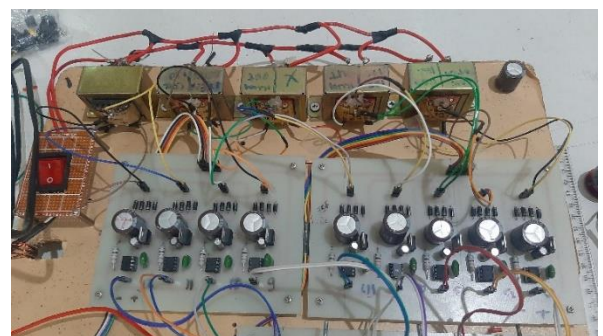


Gbr. 6 Hasil Rancang Bangun Nine Switch Inverter

*Nine switch inverter* pada penelitian ini menggunakan sembilan buah mosfet irfp460 *N-channel*, penentuan komponen dilakukan dengan melakukan perhitungan. Didapatkan tegangan *gate* ( $V_G$ ) mosfet sebesar 16,6 V, tegangan *gate source* ( $V_{GS}$ ) sebesar 20 V, arus *drain* ( $I_D$ ) sebesar 17,28 A yang tegangan *gate* mosfet sudah memenuhi tujuan dari pembangkitan *gate driver* sebesar 15V.

### B. Gate Driver

Penelitian ini menggunakan *gate driver* untuk meningkatkan tegangan dari mikrokontroler yang hanya mampu menghasilkan output 5V dan diubah menjadi 15V. *Gate driver* memproses perintah dari arduino untuk proses *switching nine switch inverter*.

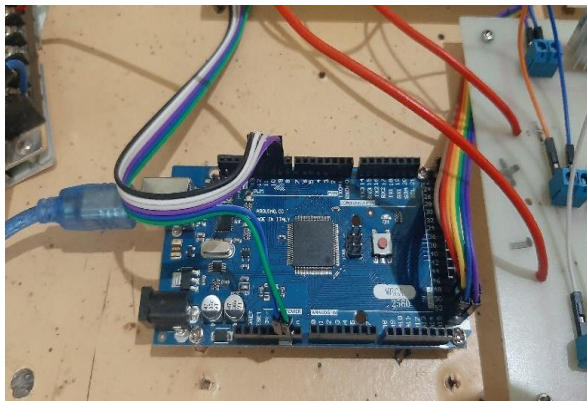


Gbr. 7 Gate Driver

### C. Mikrokontroler Arduino

Penelitian ini menggunakan arduino ATmega 2560. Arduino pada penelitian ini berfungsi sebagai mikrokontroler yang memberikan perintah untuk melakukan proses *switching* pada MOSFET. Pin yang digunakan untuk mengendalikan *switching nine switch inverter* sebanyak 13 pin terdiri dari 9 pin

untuk proses *switching* MOSFET dan 4 pin untuk *ground*.



Gbr. 8 Arduino ATmega 2560

Posisi pin arduino yang terhubung dengan mosfet irfp460 dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pin Arduino menuju tiap mosfet

No.	MOSFET Switching	Pin Arduino
1.	MOSFET 1	12
2.	MOSFET 2	10
3.	MOSFET 3	9
4.	MOSFET 4	6
5.	MOSFET 5	5
6.	MOSFET 6	3
7.	MOSFET 7	11
8.	MOSFET 8	7
9.	MOSFET 9	4

#### D. Motor Brushless DC (BLDC)

Penelitian ini menggunakan motor BLDC yang merupakan motor 3 fasa. Motor BLDC memiliki konstruksi seperti motor sinkron magnet permanen dengan kumparan magnet pada rotor dan lilitan pada stator. Motor ini digunakan karena tegangan dari motor ini sebesar 7,4V – 12V dan arus sebesar 20 Ampere yang mampu bekerja sesuai dengan *nine switch inverter*.

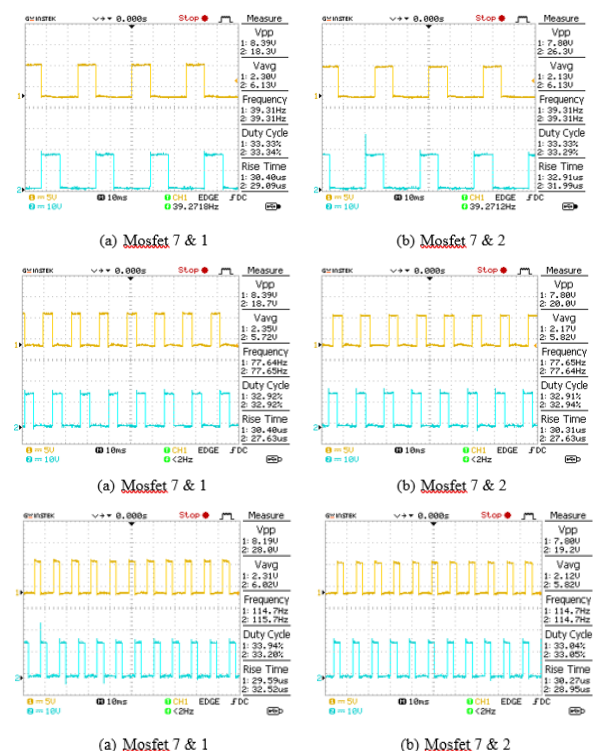
#### E. Pengujian Switching PWM

*Gate driver* merupakan perangkat yang digunakan untuk menaikkan tegangan yang diberikan masing masing pin dari arduino agar tegangan yang dihasilkan sesuai dengan tegangan kerja mosfet. *Gate driver* juga

berfungsi sebagai perangkat yang memberikan *output switching* kepada *nine switch inverter* dari pin Arduino. Frekuensi yang digunakan adalah 20 – 60 Hz dengan kelipatan 10 Hz

Tabel 3. Spesifikasi Motor BLDC

No	Spesifikasi	Nilai
1	KV Motor	1650
2	Daya Maksimal	250 W
3	Jumlah Kumparan	12
4	Diameter Stator	28 mm
5	Ketebalan Stator	17 mm
6	Berat	50 g
7	Arus Maksimal	20 A
8	Arus Tanpa Beban	1.3 A
9	Tegangan	7.4V– 12 V
10	Panjang Batang	28 mm
11	Diameter Batang	3 mm



Gbr. 8 Gelombang *switching* PWM

Bentuk gelombang PWM yang dihasilkan *gate driver* menuju *nine switch inverter* pada mosfet 1,7 & 2. Sinyal kuning pada gambar a dan b menunjukkan gelombang mosfet 7, sinyal biru pada gambar a menunjukkan gelombang mosfet 1 dan pada gambar b menunjukkan gelombang mosfet 2. Dapat

dilihat bahwa semakin tinggi frekuensinya maka bentuk gelombang akan semakin rapat.

#### F. Data Hasil Penelitian

##### 1) Perubahan frekuensi terhadap tegangan output

Pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan *output* dapat dilihat pada tabel 4 berikut. Frekuensi mempengaruhi tegangan *output*, hal ini dapat dilihat dimana setiap penambahan frekuensi sebesar 10 Hz mempengaruhi kenaikan tegangan sebesar 0,3% pada kondisi tanpa beban dan 0,2% pada kondisi dengan beban... Pengujian perubahan tegangan dilakukan dengan beban *propeller* dan tanpa beban *propeller*.

Tabel 4. Data tegangan *output*

NO	Frekuensi (Hz)	Input	Tanpa Beban	Dengan Beban
		Tegangan (Volt)	Tegangan (Volt)	Tegangan (Volt)
1	20	11,90	11,93	11,85
2	30	11,90	11,99	11,88
3	40	11,90	12,01	11,92
4	50	11,90	12,06	11,94
5	60	11,90	12,08	11,95

Beban *propeller* berpengaruh pada output tegangan sehingga dua motor BLDC tanpa beban memiliki tegangan output lebih besar daripada dengan beban.

##### 2) Perubahan frekuensi terhadap arus output

Pengujian perubahan frekuensi terhadap arus *output* dilakukan dengan beban *propeller* dan tanpa beban *propeller*. Berdasarkan data setiap penambahan frekuensi sebesar 10 Hz mempengaruhi kenaikan arus rata-rata sebesar 1.1% pada kondisi tanpa beban dan 1,4% pada kondisi dengan beban.

Tabel 5. Data arus *output*

NO	Frekuensi (Hz)	Tanpa Beban	Dengan Beban
		Arus (ampere)	Arus (ampere)
1	20	7,47	7,18
2	30	7,57	7,30
3	40	7,64	7,45
4	50	7,68	7,58
5	60	7,84	7,63

##### 3) Perubahan frekuensi terhadap kecepatan putar dan torsi motor

Pada kenaikan frekuensi terjadi kenaikan kecepatan putar dua motor BLDC, dengan perubahan frekuensi sebesar 10 Hz. Berdasarkan data hasil motor BLDC dapat berputar secara simultan dengan frekuensi yang diberikan yaitu 20 - 60 Hz. Dua motor BLDC diuji dengan menggunakan beban *propeller* dan tanpa beban *propeller*. Torsi pada dua motor BLDC didapatkan dari perhitungan.

Tabel 6. Data kecepatan putar

Frekuensi (Hz)	Kecepatan Motor (RPM)	
	Tanpa Beban Motor 1 & 2	Dengan Beban Motor 1 & 2
20	919	778,6
30	1167	1098
40	1360	1246
50	1739	1646
60	2476	2247

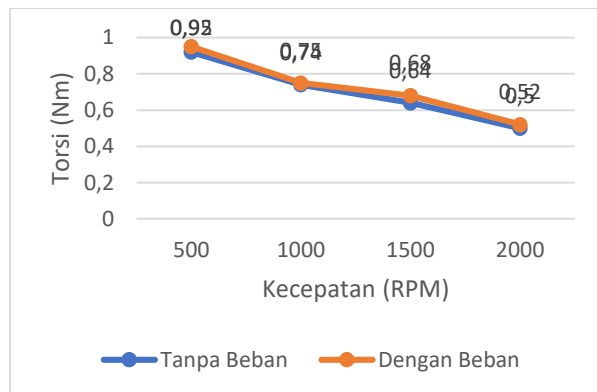
Setiap kenaikan frekuensi sebesar 10 Hz mempengaruhi kenaikan kecepatan dua motor BLDC sebesar 200 RPM, namun kenaikan frekuensi sebesar 10 Hz tidak mempengaruhi kenaikan torsi melainkan torsi akan menurun. Kemudian penggunaan beban mempengaruhi perubahan kecepatan dua motor BLDC dapat dilihat bahwa terdapat selisih rata – rata hasil kecepatan dengan beban dan tanpa beban sebesar 129 RPM.

Tabel 7. Data torsi

Frekuensi (Hz)	Torsi Motor (Nm)	
	Tanpa Beban Motor 1 & 2	Dengan Beban Motor 1 & 2
20	0,70	0,67
30	0,48	0,46
40	0,36	0,35
50	0,29	0,28
60	0,25	0,24

Kecepatan dua motor BLDC berpengaruh pada torsi dengan penurunan torsi. Semakin tinggi kecepatan yang dihasilkan maka torsi yang dihasilkan akan menurun, sehingga pada saat frekuensi 60 Hz torsi yang dihasilkan lebih kecil daripada saat frekuensi 20 Hz.

Torsi yang dihasilkan oleh dua motor BLDC tanpa beban lebih kecil daripada torsi yang dihasilkan oleh dua motor BLDC dengan beban, karena kecepatan dua motor BLDC tanpa beban lebih tinggi daripada tanpa beban.



Gbr. 9 Perubahan Torsi terhadap kecepatan

## V. KESIMPULAN

*Nine switch inverter* untuk mengendalikan dua motor BLDC telah berhasil dirancang. Pengujian perubahan frekuensi terhadap tegangan, arus, kecepatan dan torsi menunjukkan bahwa kenaikan frekuensi mempengaruhi kenaikan tegangan, arus dan kecepatan, namun torsi menurun seiring dengan kenaikan kecepatan. Beban *propeller* mempengaruhi perbedaan dari kecepatan dengan kondisi tanpa beban.

## REFERENSI

- [1] T. Kominami and Y. Fujimoto, "A novel three-phase inverter for independent control of two three-phase loads," in *Proc. IEEE-Ind. Application. Soc.(IAS)s*, 2007, pp. 2346–2350.
- [2] Roslinda Dewi. "Efek *Duty Cycle Pwm* pada Pengendalian Kecepatan Motor BLDC 3 Fasa. *Jurnal Elektro*," JEPKA: Journal of Electrical Power Control and Automation Vol.1 No.1 Juni 2018 e-ISSN 2621-556X.
- [3] Jian., Z, Yangwei, Y. *Brushless DC Motor Fundamental*. MPS Proprietary Information AN047. Juli 2011.
- [4] Fikra Titan Syifa, Eka Firmansyah, & Priyat Madi, "Pengendalian Motor DC Tanpa Sikat Sederhana dengan DSC 16-bit pada Aplikasi EDF," JNTETI, Vol. 4, No. 4, November 2015.
- [5] Akbar Danu & Riyadi Slamet. "Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*)," Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO) Bandung, Indonesia, 10-11 Desember 2018.
- [6] Muhammad Andang Novianta. "Analisis Motor Induksi Satu Fasa dengan Metode Cycloconverter berbasis Mikrokontroler AT89C51," ISSN : 1693-6930. TELKOMIKA Vol. 5, No. 1, April 2007 : 27 – 31.
- [7] Rangga Jaya Andika, Angga Rusdinar, & Agung Surya Wibowo, "Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali kecepatan motor BLDC berbasis PWM pada mobil listrik," ISSN : 2355-9365.
- [8] Ali, Muhamad, (2018), Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta : UNY Press 2018.
- [9] Sony Prakarsa Putra, & Putra Zulwisli. "Inverter PWM Untuk Menggerakkan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat Berbasis Arduino," VOTEKNIKA : Jurnal Vokasional Teknik Elektronika dan Informatika. Vol. 7, No. 4, Desember 2019.
- [10] Ruby Jose, & Reshmi, "A Nine Switch Z-Source Inverter for Independent Control of Two Three-Phase Motors," International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET). Vol. 6 Issue 1. September 2015. ISSN: 2278-621X.
- [11] Wisnu sonjaya Suhendar, & Engkos Koswara, "Analisis Pengaruh *dutycycle* dan frekuensi Terhadap Kecepatan Motor Listrik," Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan : 2020.
- [12] Sneha Nandankar , & Goyal. "Simulation Analysis of Nine Switch Inverter for Induction Motor Drive," International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. Volume: 3 Issue: 2. September 2015. ISSN: 2321-8169.