

**SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN DUA MOTOR *BRUSHLESS* DC
(BLDC) DENGAN *NINE SWITCH INVERTER* MENGGUNAKAN METODE
PWM**

(Skripsi)

Oleh:

ARNEL ALBERTA CLINTON



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2021**

**SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN DUA MOTOR *BRUSHLESS* DC
(BLDC) DENGAN *NINE SWITCH INVERTER* MENGGUNAKAN METODE
PWM**

Oleh

Arnel Alberta Clinton

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Program Studi Teknik Elektro
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN DUA MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN *NINE SWITCH INVERTER* MENGGUNAKAN METODE PWM

Oleh :

Arnel Alberta Clinton

Untuk mengendalikan kecepatan dua motor *brushless DC* (BLDC) pada umumnya memerlukan dua inverter yang pengendaliannya rumit dan tidak hemat. Dalam tugas akhir ini, pengendalian kecepatan dua motor BLDC menggunakan *nine switch inverter* dan metode *pulse width modulation* (PWM). Proses *switching* inverter memerlukan modulasi PWM dengan modulasi lebar pulsa untuk mengendalikan frekuensi dan tegangan. Penggunaan *nine switch inverter* sebagai *Switching* untuk pengaturan dua motor BLDC karena menggunakan lebih sedikit *switch* dan dapat mengendalikan dua motor BLDC secara individu.

Dalam pengendalian dua motor BLDC dengan mengatur frekuensi *input* didapatkan hasil pengaruh perubahan frekuensi *input* terhadap tegangan, arus, torsi dan kecepatan dua motor BLDC. Pengujian dari pengendali ini terdiri dari kondisi motor berbeban *propeller* dan tanpa beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kenaikan frekuensi dengan *range* sebesar 10 Hz mempengaruhi kenaikan kecepatan rata-rata sebesar 0,21% pada kondisi tanpa beban dan 0,22% pada kondisi dengan beban, namun kenaikan frekuensi dengan *range* sebesar 10 Hz menyebabkan torsi akan menurun sebesar 0,23% pada kondisi tanpa beban dan 0,22% pada kondisi dengan beban.

Kata kunci: Dua Motor *brushless DC* (BLDC), *Nine switch Inverter*, dan *Pulse Width Modulation* (PWM)

ABSTRACT

SPEED CONTROL OF TWO BRUSHLESS DC (BLDC) MOTOR WITH NINE SWITCH INVERTER USING PWM METHOD

By:

Arnel Alberta Clinton

Commonly to control the speed of two brushless DC motors needs two inverters. Two inverters are complex and it cost more. This research is about control of two BLDC. The purpose is to control the speed of the motor by using the nine switch inverter as the switch and pulse width modulation (PWM) as the modulation method to control the switch. Pulse width modulation (PWM) used as switching method which control the pulse wave by modulation and make the amplitude constant.

By adjusting the input frequency of two BLDC motors control, the results of frequency are on the voltage, current, torque dan speed. The test of this controller consist of two BLDC motors with propellers loads and no load. The results show that every increase of frequency with a range of 10 Hz affects the average speed increase of 0,21% without propeller and 0,22% with propeller, but an increase in frequency in a range of 10 Hz cause the torque to decrease by 0,23% without propeller and 0,22% with propeller.

Keywords: Two brushless DC motors (BLDC), nine switch inverter, pulse width modulation

Judul Skripsi : SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN DUA
MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN
NINE SWITCH INVERTER MENGGUNAKAN
METODE PWM

Nama Mahasiswa : Arnel Alberta Clinton

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615031044

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Dr. Eng. Charles R. Harahap, S.T., M.T.
NIP. 19691211 1999031 001



Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.
NIP. 19730215 199903 2 003

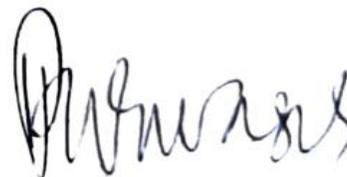
2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro



Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng
NIP. 19700719 200012 1 001

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP. 19740422 200012 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Charles R. Harahap, S.T., M.T.** 

Sekretaris : **Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.** 

Penguji
Bukan Pembimbing : **Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.** 

2. Dekan Fakultas Teknik




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.S.c.
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **09 Desember 2021**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**Sistem Pengendalian Kecepatan Dua Motor *Brushless* DC (BLDC) Dengan *Nine Switch Inverter* dan Metode PWM**”, merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat hasil karya orang lain. Semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung apabila di kemudian hari terbukti bahwa karya saya meniru atau plagiat karya orang lain, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandarlampung, 24 Desember 2021



Amel Alberta Clinton
1615031044

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 12 April 1998, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Peniel Siregar dan Ibu Ariyanti Batubara. Riwayat Pendidikan dari penulis diselesaikan di Sekolah Dasar Mutiara Bunda pada tahun 2010. Sekolah Menengah Pertama *Saint John's* pada tahun 2013, dan Sekolah Menengah Atas *Saint John's* pada tahun 2016.

Pada tahun 2016, Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN 2016. Selama menjadi mahasiswa penulis mengambil konsentrasi Teknik Tenaga Listrik (TTL) di semester 5 sebagai fokus perkuliahan dan penelitian. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah aktif menjadi anggota departemen Sosial dan Kewirausahaan periode 2017 – 2018 kemudian mejadi anggota departemen Pengembangan dan Keteknikan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung periode 2018 – 2019, Penulis melaksanakan kerja praktik di PLTMG Sutami, Tanjung Bintang, Lampung.



MOTO

“Just because you took longer than others doesn’t mean you are failed”

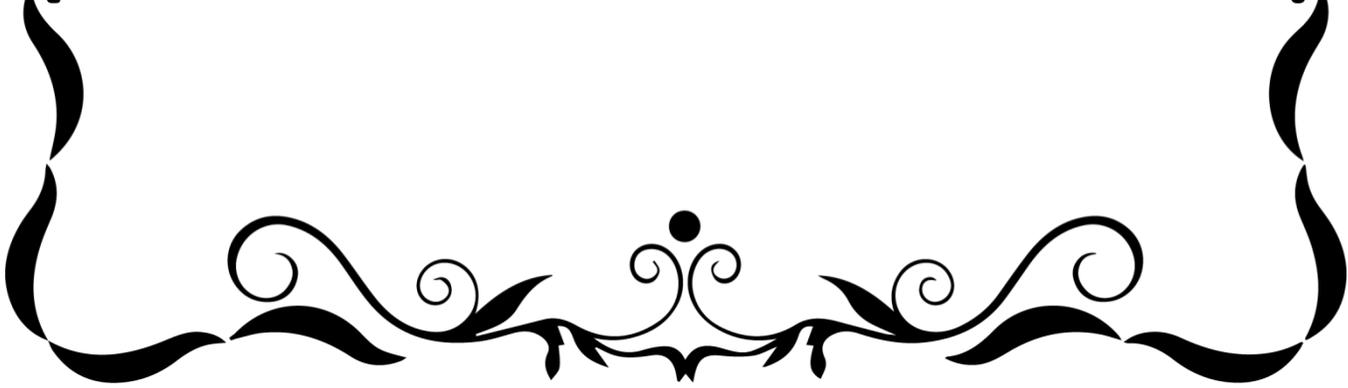
“Carilah pengalaman sebanyak mungkin selama masih muda agar kita punya cerita untuk anak dan cucu kita”

“Pencobaan-pencobaan yang kamu alami ialah pencobaan-pencobaan biasa. yang tidak melebihi kekuatan manusia. Sebab Allah setia dan karena itu Ia tidak akan membiarkan kamu dicobai melampaui kekuatanmu. Pada waktu kamu dicobai Ia akan memberikan kepadamu jalan ke luar, sehingga kamu dapat menanggungnya”

(1 Korintus 10:13)

“Manusia hidup bukan hanya dari roti, melainkan dari setiap firman yang keluar dari mulut Tuhan”

(Matius 4:4)





Puji Syukur kepada Tuhan Yesus

Atas kuat kuasa-Nya, kupersembahkan karyaku ini sebagai wujud
terimakasih kepada kedua orang tuaku:

Peniel Siregar & Ariyanti Batubara

“Hormatilah ayahmu dan ibumu, seperti yang diperintahkan kepadamu
oleh Tuhan, Allahmu, supaya lanjut umurmu dan baik keadaanmu di
tanah yang diberikan Tuhan, Allahmu, kepadamu.”

Ulangan 5:16



SANWACANA

Puji syukur dan Terima Kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan kasih karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN DUA MOTOR *BRUSHLESS* DC (BLDC) DENGAN *NINE SWITCH INVERTER* MENGGUNAKAN METODE PWM”**.

Penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung. Skripsi ini diharapkan agar dapat bermanfaat bagi para pembaca dan peneliti dalam hal memberi kontribusi pengetahuan di bidang Teknik Elektro.

Penulis dalam menyelesaikan skripsi ini menemukan beberapa hambatan dan berbagai hal, namun banyak pihak yang membantu dalam proses menyelesaikan skripsi ini hingga selesai.

Oleh karena itu kesempatan ini hendaknya penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Karomani, M.Si. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.S.c. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3. Bapak Khairudin S.T., M.Sc., PhD. Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan Pembimbing Akademik saya.
4. Ibu Herlinawati S.T., M.T., selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
5. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T., selaku Pembimbing Utama atas kesediaannya untuk membimbing, memberi saran, kritik, motivasi dan nasihat-nasihat yang bermanfaat dan segala ilmu yang telah diberikan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
7. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari S.T., M.T., selaku Pembimbing kedua atas kesediaannya untuk membimbing, memberi saran, motivasi, kritik dan nasihat-nasihat yang bermanfaat dan segala ilmu yang telah diberikan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
8. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto M.T., selaku Penguji Utama skripsi ini. Terima Kasih atas masukan, saran, kritik motivasi dan juga nasihat-nasihat yang sangat bermanfaat dan segala ilmu yang telah diberikan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu, motivasi yang bermanfaat bagi penulis.
10. Bapak dan Ibu Staf Administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Staf Administrasi Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

11. Rekan Teknik Elektro SINS Angkatan 2016 yang tidak dapat Penulis sebutkan satu per satu, atas dukungan, kebersamaan dan doa.
12. Rekan – rekan perjuangan hantu dan konversi yaitu Faisal, Made Rai MDR, Farhan Kembar, Aan, Aby, Anjas, Bagawi, Lukmen, Panji, Budi, Sandi, Syahrul, Yosa, Rahmat, Mangasi, Bos Zulfahnur, Tio dan Kak Rizki.
13. Teman – teman seperjuangan akhir Zulfahnur, Dona, Falaq, Hafizh, Angga.
14. Teman – teman SMA Saya Reynaldo Cetut, Marcell Kiwil, Bryan, Reyes dan Rere.
15. Teman-teman GKPA Lampung yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.
16. Teman – teman sekawan berempat Niko, Dela dan Sadrak.
17. Teman – teman satu atap Nio, Udin, Ilham.
18. Keluarga saya Papa, Mama dan Adik saya Jediya yang turut mendoakan dan selalu mendukung saya baik dalam bentuk materi dan ilmu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, akan tetapi besar harapan semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Tuhan memberkati kita semua. Amin

Bandar Lampung, 24 Desember 2021
Penulis,

Arnel Alberta Clinton

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Rumusan Masalah	3
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Motor <i>Brushless DC</i> (BLDC)	6
2.1.1 Konstruksi <i>Brushless DC</i> (BLDC).....	7
2.1.2 Prinsip Kerja <i>Brushless DC</i> (BLDC)	8

2.2 Pengendalian Kecepatan Motor <i>Brushless DC</i> (BLDC).....	10
2.3 Inverter	10
2.4 <i>Pulse Widht Modulation</i> (PWM)	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	14
3.1 Waktu & Tempat penelitian.....	14
3.2 Alat dan Bahan	15
3.3 Metode Penelitian	19
3.4 Diagram Alir Penelitian	24
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Pendahuluan.....	25
4.2 Rancang Bangun <i>Nine Switch Inverter dan Gate Driver</i>	26
4.3 Pengujian Rancang Bangun	29
4.3.1 Pengujian PWM Arduino.....	29
4.3.2 Pengujian <i>Switching</i> PWM	30
4.4 Data Hasil Penelitian.....	33
4.4.1 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan <i>output</i>	33
4.4.2 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus <i>output</i>	34
4.4.3 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecepatan putar dan torsi motor BLDC	36

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... 38

5.1 Kesimpulan 38

5.2 Saran 39

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC	7
Gambar 2.2 Contoh rangkaian inverter	11
Gambar 2.3 Contoh gelombang output PWM	12
Gambar 3.1 Mikrokontroler Arduino	17
Gambar 3.2 Motor <i>Brushless DC</i> (BLDC)	18
Gambar 3.3 Baterai Lipo 3s 2200mah	19
Gambar 3.4 Perancangan alat	19
Gambar 3.5 Rangkaian PSIM <i>Nine switch Inverter</i>	20
Gambar 3.6 Rangkaian <i>Nine Switch Inverter</i>	21
Gambar 3.7 Contoh gelombang PWM	23
Gambar 3.8 Diagram Alir Tahap Awal Penelitian	24
Gambar 4.1 Hasil Rancang Bangun <i>Nine Switch Inverter</i>	26
Gambar 4.2 Rangkaian Diptrace <i>Nine Switch Inverter</i>	27
Gambar 4.3 Rangkaian <i>Nine Switch Inverter</i>	27
Gambar 4.4 Rangkaian <i>Gate Driver</i>	28

Gambar 4.5 Gambar Diptrace <i>Gate Driver</i>	28
Gambar 4.6 Hasil pengujian PWM dari arduino menuju <i>gate driver</i>	30
Gambar 4.7 Keluaran <i>gate driver</i> menuju mosfet 1, 7 & 2 saat frekuensi 20 Hz	31
Gambar 4.8 Keluaran <i>gate driver</i> menuju mosfet 1, 7 & 2 saat frekuensi 40 Hz	31
Gambar 4.9 Keluaran <i>gate driver</i> menuju mosfet 1, 7 & 2 saat frekuensi 60 Hz.....	32
Gambar 4.10 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan <i>Output nine switch inverter</i>	33
Gambar 4.11 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus <i>Output nine switch inverter</i>	35
Gambar 4.12 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap torsi motor.....	36

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	14
Tabel 3.2 Alat dan Bahan.....	15
Tabel 3.3 Pin Arduino dan MOSFET	16
Tabel 3.4 Spesifikasi Motor BLDC	17
Tabel 3.5 Tabel Pensaklaran <i>Nine Switch Inverter</i>	22
Tabel 4.1 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan <i>Output</i>	33
Tabel 4.2 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus.....	34
Tabel 4.3 Pengaruh Perubahan Frekuensi Terhadap Kecepatan Putaran BLDC	36

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan komponen elektronika daya banyak ditemui dalam kehidupan sehari-hari, baik dalam skala industri maupun rumahan. umumnya pengendalian kecepatan dua motor *brushless* DC (BLDC) dapat ditemui pada mobil listrik, kereta listrik, *drone* dan lain-lain. Dalam pengendalian kecepatan dua motor BLDC tiga fasa secara bersamaan menggunakan komponen elektronika daya berupa dua buah inverter tiga fasa. Hal ini dinyatakan oleh Tsutomu Kominami dan Yasutaka Fujimoto dalam jurnal dengan judul “*A Novel Nine Switch Inverter for Independent Control of Two Three-phase Loads*” [1]. Penggunaan dua buah inverter tidak hemat dan lebih rumit karena memerlukan dua buah inverter terpisah untuk masing-masing motor. Setiap inverter memiliki enam buah *switch* dengan menghubungkan secara paralel ke sebuah inverter. Alternatif yang dapat digunakan untuk pengendalian dua motor BLDC secara bersamaan adalah dengan menggunakan satu inverter yang dapat mengendalikan dua motor BLDC sekaligus. Perangkat untuk mengendalikan dua motor BLDC adalah inverter yang dimodifikasi menjadi *nine switch inverter* (inverter dengan sembilan buah *switch*). *Nine Switch inverter* merupakan inverter tiga fasa *full bridge*.

Pengendalian kecepatan dua motor BLDC memerlukan *pulse width modulation* (PWM) yang berfungsi untuk mengatur *switch* pada inverter dengan pengaturan lebar modulasi pulsa dengan sinyal referensi [2]. Pengendalian kecepatan dua motor BLDC dengan PWM agar dua motor BLDC dapat berputar secara simultan. Secara umum metode PWM terbagi menjadi dua yaitu bipolar dan unipolar. Teknik bipolar merupakan suatu teknik *switching* yang menggunakan gelombang sinusoidal dan gelombang segitiga untuk menghasilkan gelombang PWM. Pada teknik ini terdapat dua keadaan yaitu akan ditandai dengan keadaan *on* dan *off*. Pada keadaan *on* besarnya gelombang sinusoidal lebih besar dibandingkan gelombang segitiga sementara dan pada keadaan *off* maka besarnya gelombang segitiga lebih besar dibandingkan dengan gelombang sinusoidal. Untuk teknik unipolar, terdapat dua gelombang sinusoidal (V_r) atau lebih dan gelombang segitiga (V_c), sehingga terdapat tiga keadaan yang dihasilkan pada gelombang PWM, yaitu keadaan *on*, *off*, dan keadaan 0.

Penelitian ini merancang sebuah *nine switch inverter* yang lebih hemat dan menggunakan teknik PWM bipolar yang diterapkan untuk mengatur *switch*, dengan mengatur frekuensi *input* yang diatur pada mikrokontroler. Perubahan frekuensi akan mempengaruhi perubahan torsi dan kecepatan dua motor BLDC yang diuji dengan beban *propeller* dan tanpa beban *propeller*.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengendalikan kecepatan dua motor BLDC dengan *nine switch inverter* menggunakan metode PWM.
2. Menelaah kinerja dua motor BLDC baik tegangan, frekuensi maupun kecepatan putar akibat penggunaan *nine switch inverter* dan PWM, baik menggunakan beban *propeller* dan tanpa beban *propeller*.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut:

1. Dua motor BLDC dapat dikendalikan dengan *nine switch inverter* dengan metode PWM secara simultan.
2. Dapat diperoleh hasil kecepatan putar dua motor BLDC dengan penggunaan *nine switch inverter* dan PWM dengan mengatur frekuensi.

1.4 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang pengendali dua motor BLDC menggunakan dengan *nine switch inverter* menggunakan metode *pulse width modulation* (PWM).
2. Bagaimana pengaruh perubahan kecepatan dua motor BLDC baik menggunakan beban *propeller* dan tidak menggunakan beban *propeller*.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini membahas mengenai *nine switch inverter* untuk pengendalian kecepatan dua motor BLDC dengan metode *pulse width modulation (PWM)*.
2. Penelitian ini menggunakan mikrokontroler untuk rancang bangun *nine switch inverter* dan PWM.
3. Penggunaan PWM dengan mikrokontroler untuk proses *switching* dengan mengatur frekuensi *input*.

1.6 Hipotesis

Nine switch inverter dapat digunakan untuk pengendalian kecepatan motor BLDC dengan metode PWM, dimana dua motor BLDC dapat di kontrol dengan satu inverter tanpa menggunakan dua inverter.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan mengenai landasan teori secara garis besar yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi mengenai hasil pengujian dan pembahasan terhadap hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor *Brushless DC* (BLDC)

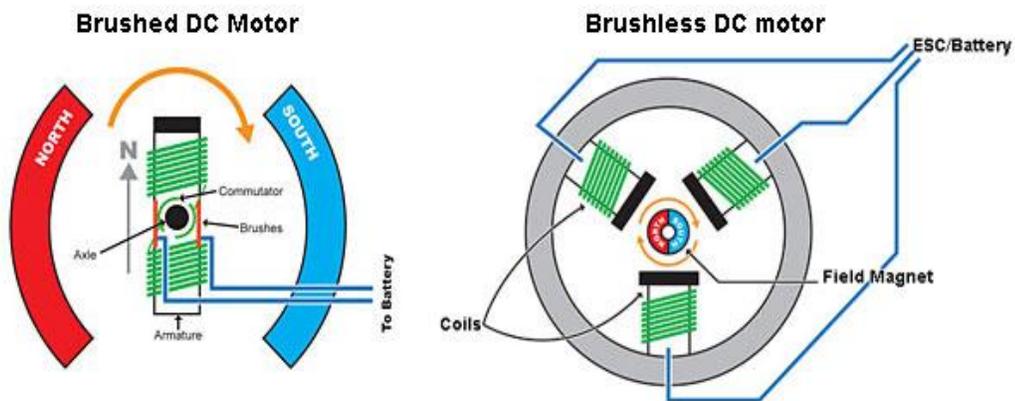
Motor *brushless DC* (BLDC) merupakan motor listrik atau mesin listrik yang berputar pada kecepatan konstan mulai tanpa beban sampai beban penuh. Untuk pembangkitannya motor BLDC menggunakan tiga fasa untuk membangkitkan medan magnet putar dan interferensi elektromagnetis yang di suplai dengan arus. Rotor pada motor BLDC bertindak seperti magnet yang di tarik oleh medan stator yang berputar. Penarikan oleh medan stator akan menghasilkan torsi pada rotor dan menyebabkan rotor berputar dengan medan [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 magnet.

Pada saat *start up*, rotor dihilangkan tenaganya. Motor dijalankan dengan cara sama seperti motor sangkar tupai atau rotor yang tergantung konstruksinya, untuk *start-up* motor BLDC menggunakan arus DC dan diubah menjadi arus AC dengan inverter agar dapat menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Apabila rotor mencapai hampir 95% kecepatan sinkron, arus mengalir pada lilitan penguat.

Arus menghasilkan kutub utara dan selatan yang pasti pada rotor, yang mengunci pada medan magnet putar dari stator dan memutar rotor pada kecepatan sinkron.

2.1.1 Konstruksi Motor BLDC

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 2.1.



Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC

(sumber: omahdrones.com)

Magnet permanen motor BLDC dilengkapi dengan kumparan 3 fasa. Kumparan dapat ditemui di bagian stator. Magnet pada BLDC dapat ditemui pada rotor. Fasa kumparan diaktifkan dengan penyesuaian gerakan rotor. Kecepatan dua Motor BLDC dapat diukur dengan rumus 2.2 dengan menghitung nilai frekuensi dan kutub motor.

$$P = T\omega \quad (2.1)$$

$$n = 120f/P \quad (2.2)$$

Keterangan:

P: Daya (Watt)

T: Torsi (Rpm)

ω : Kecepatan Sudut (Rad/sekon)

n: kecepatan putar (rev/sekon)

f: frekuensi (Hz)

2.1.2 Prinsip Kerja 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].

Apabila kumparan jangkar dihubungkan ke sumber tegangan tiga fasa maka akan timbul medan putar pada stator. Kutub medan rotor yang diberi penguat arus searah mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga berputar dengan kecepatan yang

sama (sinkron). Dilihat dari segi adanya interaksi dua medan magnet, maka kopel yang dihasilkan oleh motor sinkron merupakan sudut fungsi sudut kopelnya.

Pada beban nol, posisi sumbu kutub medan putar berimpit dengan sumbu pada kumparan medan. Setiap ada penambahan beban medan motor akan tertinggal sebentar dari medan stator berbentuk sudut kopel, kemudian berputar dengan kecepatan yang sama lagi. Beban maksimum tercapai ketika sudut kopelnya bernilai 90° . Apabila ada penambahan beban lebih lanjut dapat mengakibatkan kehilangan kekuatan pada kopel dan motor akan kehilangan sinkronisasi.

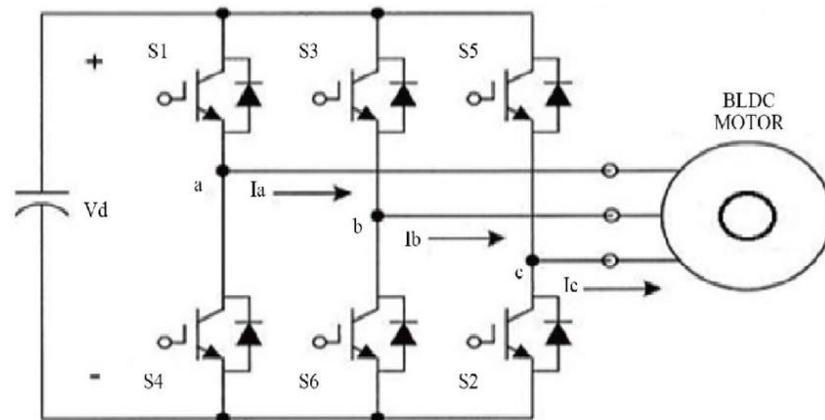
Pada motor induksi tidak terdapat kumparan medan, sehingga untuk sumber pembangkit fluks hanya diperoleh dari daya masuk, stator, daya masuk untuk pembangkit fluks merupakan daya induktif, oleh karena itu motor induksi bekerja pada faktor kerja terbelakang. Motor sinkron memiliki dua sumber pembangkit fluks yaitu arus AC dan arus DC pada rotor [6]. Apabila arus medan pada rotor cukup untuk membangkitkan fluks (ggm) yang dibutuhkan motor, maka stator tidak perlu memberikan arus permagnetan atau daya reaktif dan motor bekerja pada faktor kerja = 1. Sementara apabila arus medan pada rotor kurang (penguatnya berkurang), stator akan bekerja untuk menarik arus permagnetan dari jala-jala, sehingga motor akan bekerja pada faktor kerja terbelakang. Sebaliknya apabila arus medan pada rotor berlebih (penguatnya berlebih), kelebihan fluks (ggm) harus dibuat seimbang, dan stator akan menarik arus yang bersifat kapasitif dari jala-jala, sehingga motor bekerja pada faktor kerja terdahulu. Dengan demikian jelas bahwa faktor kerja motor sinkron dapat diatur dengan mengubah nilai arus medan.

2.2 Pengendalian Kecepatan Motor *Brushless DC* (BLDC)

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 [7]. PWM akan mengirimkan sinyal hasil gelombang yang telah di modulasi menuju inverter dan kecepatan pada motor sinkron magnet permanen dapat diatur dengan hasil gelombang dan tegangan yang masuk menuju pada inverter.

2.3 Inverter

Inverter adalah suatu peralatan elektronika daya yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak – balik (AC) baik satu fasa dan tiga fasa. Penggunaan inverter banyak ditemui pada bidang industri maupun rumahan dan digunakan untuk perangkat elektronik, inverter umum digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik [8]. Prinsip kerja dari inverter adalah mengubah sumber tegangan DC yang bersumber dari baterai atau *power supply* menjadi tegangan AC dengan frekuensi yang telah diubah sehingga motor dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan yang diinginkan dengan menggunakan PWM. Komponen yang digunakan pada inverter dapat berupa SCR, transistor, dan MOSFET yang beroperasi sebagai *switch*.



Gambar 2.2 Contoh rangkaian inverter

(sumber: researchgate.net)

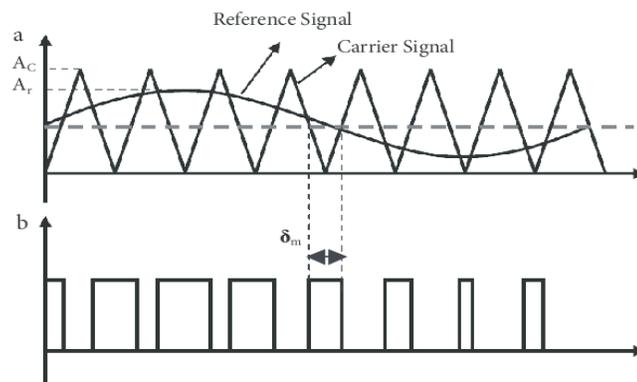
Gambar 2.2 merupakan inverter 3 fasa terdiri enam *switch* yang mampu mengendalikan kecepatan motor AC atau DC 3 fasa. Inverter dapat digunakan dalam mengubah kecepatan putaran motor BLDC dengan cara mengubah *input* listrik motor DC menjadi AC dengan frekuensi yang dapat diatur, sehingga motor dapat dikendalikan sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Terdapat beberapa teknik pengendalian yang dapat digunakan agar inverter dapat menghasilkan gelombang sinusoidal. Salah satunya dengan mengatur keterlambatan sudut penyalaan inverter pada setiap *switch*. Metode yang paling umum digunakan adalah menggunakan PWM.

2.4 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. PWM merupakan suatu teknik yang membandingkan sinyal referensi (V_r) dengan

sinyal *Carrier* (V_c) [9]. Sinyal referensi (V_r) berupa sinyal sinusoidal dan sinyal *carrier* berupa gelombang segitiga ataupun gelombang gigi gergaji.

Prinsip dasar dari teknik PWM adalah ketika besarnya amplitudo sinyal referensi (V_r) lebih besar dari amplitudo sinyal *carrier* (V_c) maka dihasilkan sinyal *high* atau *on* dan jika besar amplitudo sinyal referensi (V_r) berada lebih kecil dari amplitudo sinyal *carrier* (V_c) maka dihasilkan sinyal *low* atau *off* [10]. Proses perbandingan sinyal referensi (V_r) dan sinyal *carrier* (V_c) dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Contoh bentuk gelombang output PWM

(sumber: researchgate.net)

Pada gambar 2.3 diatas merupakan hasil pembentukan gelombang sinyal referensi (V_r) dan sinyal *carrier* (V_c). Dari gambar diatas didapat sinyal PWM yang menunjukkan posisi *high* atau posisi T_{on} dan *low* atau posisi T_{off} . T_{on} merupakan lama waktu tegangan keluaran berada di posisi *high* sedangkan T_{off} merupakan lama waktu tegangan keluaran berada di posisi *low*. Penjumlahan lama waktu dari T_{on} dengan T_{off} menghasilkan T_{total} yang biasa dikenal dengan satu perioda gelombang.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (2,3)$$

Dari besarnya T_{on} dan T_{off} ini maka dapat ditentukan besarnya *duty cycle* yaitu dengan membandingkan waktu ketika gelombang berada dalam keadaan *on* dibagi dengan total waktu antara gelombang dalam keadaan *on* dan gelombang dalam keadaan *off* sehingga *duty cycle* dapat diperoleh dengan persamaan.

$$Duty\ cycle = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \quad (2,4)$$

Duty cycle berfungsi sebagai pulsa yang memberikan sudut penyalaaan yang mengontrol dalam keadaan *on* atau *off* pada sakelar. Untuk dapat membangkitkan sinyal PWM terdapat 2 macam cara, yaitu dengan komponen analog atau komponen digital. Komponen analog dapat menggunakan IC (*Integrated Circuit*) sementara komponen digital dapat menggunakan mikrokontroler.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan tempat penelitian

Penelitian tugas akhir ini dimulai pada bulan November 2020 sampai Desember 2021 bertempat di Laboratorium Konversi Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, jadwal kejadian penelitian dituangkan tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No.	Kegiatan	Waktu
1	Studi Literatur	November 2020
2	Seminar Proposal	November 2020
3	Perancangan Alat dan Sistem	November 2020 – Februari 2021
4	Pengujian Alat dan Sistem	Februari 2021 – April 2021
5	Analisis dan Hasil	April 2021 – Juni 2021
6	Pembuatan Laporan	Juni 2021 – Juli 2021
7	Seminar Hasil	Agustus 2021
8	Ujian Komprehensif	Desember 2021

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan Bahan yang digunakan pada penelitian ini dituangkan dalam tabel 3.2

Tabel 3.2 Alat dan Bahan

No.	Alat dan Bahan	Keterangan
1.	Laptop	Sebagai perangkat untuk menulis laporan skripsi dan membuat <i>coding</i> arduino.
2.	Arduino ATmega 2560	Mikrokontroler arduino dengan 54 pin yang mampu berfungsi untuk membangkitkan PWM,
3.	Dua buah motor BLDC Turnigy Air L2110	Motor BLDC dengan daya 250 W, tegangan 7.4V– 12 V dan arus maksimal 20A.
4.	<i>Nine Switch inverter</i>	Inverter 3 fasa yang mampu mengubah sumber DC ke AC untuk menggerakkan dua motor BLDC, menggunakan komponen mosfet irfp460 dengan $V_{DS} = 500 \text{ V}$, $V_{GS} = 20 \text{ V}$ dan I_D maksimum = 20 A

5.	Baterai Lipo 3s	Sebagai sumber DC 12 V yang akan digunakan pada rangkaian.
----	-----------------	--

3.2.1 Mikrokontroler

Arduino ATmega 2560 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*. Untuk posisi Pin dan mosfet dapat dilihat pada tabel 3.3 dan gambar arduino dapat dilihat pada gambar 3.1.

Tabel 3.3 Pin Arduino dan Mosfet

No.	MOSFET <i>Switching</i>	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



Gambar 3.1 Mikrokontroler Arduino

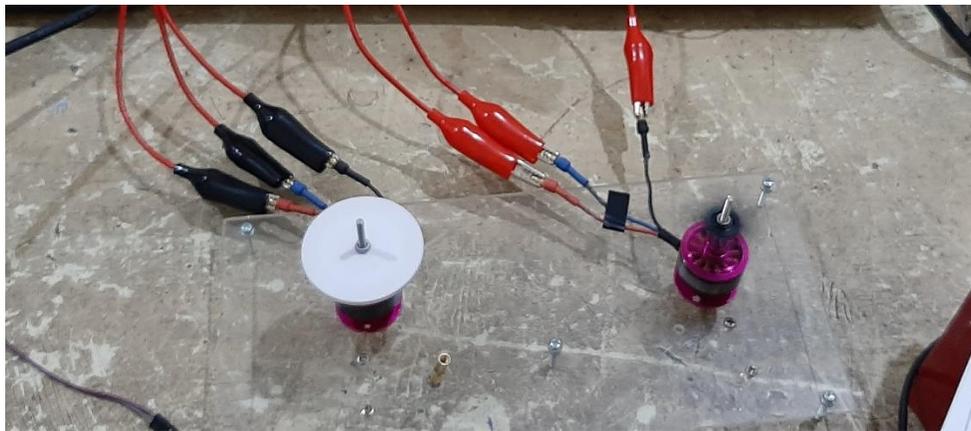
3.2.2 Motor *Brushless* DC (BLDC)

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 A yang mampu bekerja sesuai dengan *nine switch inverter*. Spesifikasi motor BLDC dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.4 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



Gambar 3.2 Motor *Brushless DC* (BLDC)

3.2.3 Baterai Lipo 3s 2200mah

Penelitian ini menggunakan baterai lipo 3s dengan jumlah tiga *cell*, *output* tegangan sebesar 12 V dan arus *output* sebesar 10-20 A yang mampu membangkitkan motor *brushless DC* (BLDC) yang ada pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Baterai Lipo 3s 2200mah

3.3 Metode Penelitian

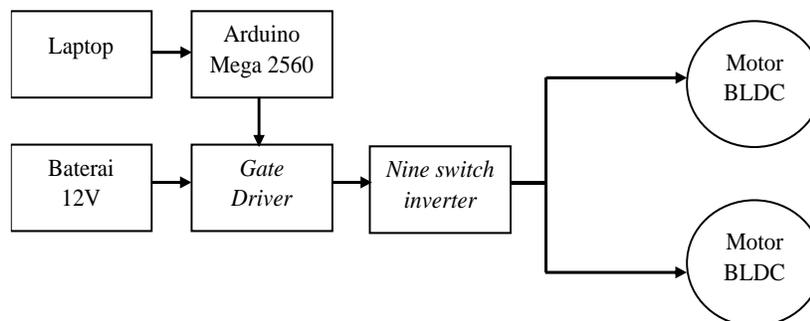
Adapun penelitian ini dilakukan dengan tahapan, sebagai berikut.

3.3.1 Perancangan Inverter

Pada tahap ini merupakan perancangan *nine switch inverter* pada penelitian ini.

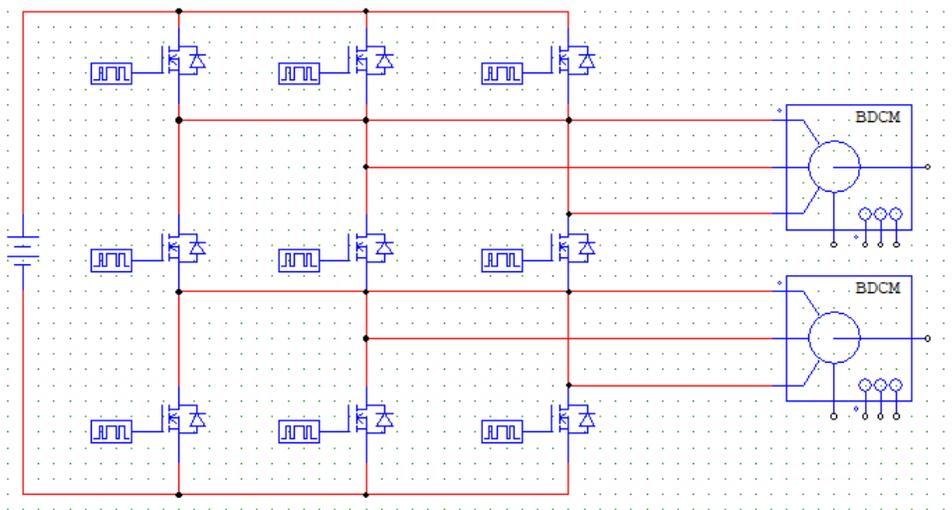
Perancangan ini menggunakan rangkaian *gate driver* dan *nine switch inverter*.

Perancangan *nine switch inverter* dapat dilihat pada gambar



Gambar 3.4 Perancangan alat

Dari gambar 3.4 telah dijelaskan bahwa pengendalian kecepatan dua motor BLDC dikendalikan oleh mikrokontroler dengan mengatur frekuensi *input* menggunakan laptop. Tegangan *output* dari mikrokontroler tidak mampu untuk membangkitkan *gate* pada mosfet dan memerlukan *gate driver* agar *gate* mosfet pada *nine switch inverter* dapat dibangkitkan. Selanjutnya ketika *nine switch inverter* telah berhasil dibangkitkan maka dua motor BLDC akan berputar dengan proses *switching* yang terjadi pada *nine switch inverter*.

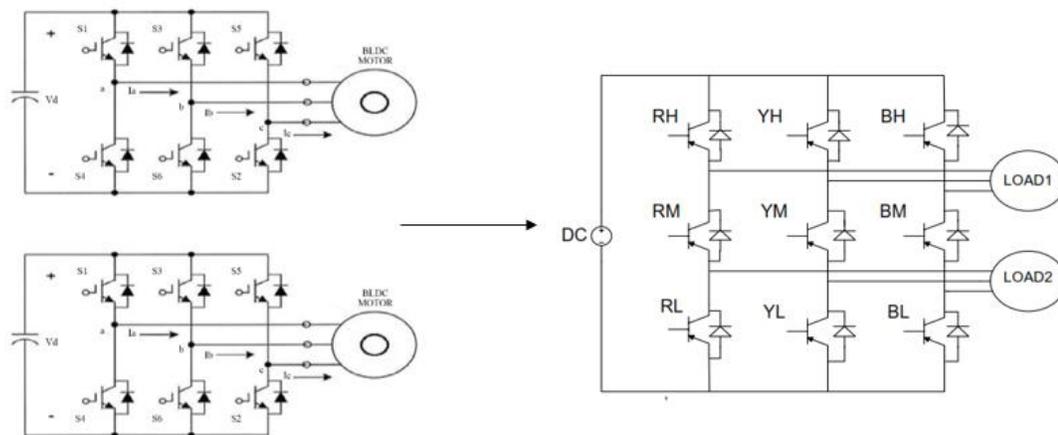


Gambar 3.5 Rangkaian PSIM *Nine switch Inverter*

Rangkaian *nine switch inverter* menggunakan sembilan buah sakelar semikonduktor mosfet yang tersusun seperti gambar 3.5. Dua motor BLDC dihubungkan secara paralel ke rangkaian *nine switch inverter*. Mosfet akan bekerja ketika arus mengalir dari sumber DC yang kemudian dialirkan untuk mengontrol dua motor BLDC. Mosfet digunakan karena kemampuan terhadap tegangan yang bagus dan untuk proses *switching* cepat dan mudah untuk dikendalikan.

3.3.2 Nine Switch Inverter

Pengendalian dua motor BLDC memerlukan inverter sebagai *switch* dengan PWM sebagai modulasinya. *Nine switch inverter* digunakan karena mampu mengendalikan dua motor BLDC secara simultan [11]. *Nine switch inverter* merupakan inverter 3 fasa *full bridge*. Rangkaian *Nine switch inverter* dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Rangkaian *Nine Switch Inverter*

Rangkaian *nine switch inverter* merupakan modifikasi dari dua rangkaian inverter 3 fasa dengan dua belas *switch* yang dibuat menjadi sembilan *switch*, dengan posisi *switch* di bagian tengah RM, YM dan BM (*loop*) merupakan jembatan sinyal yang berfungsi untuk proses *switching* pada rangkaian di atas dan bawah. *Nine switch inverter* terbagi menjadi dua inverter (*upper* dan *lower*). Berdasarkan gambar 3.6, prinsip kerja *nine switch inverter*, *switch* pada bagian atas RH, YH dan BH dengan RM, YM dan BM bekerja dengan referensi sinyal gelombang atas (*upper*), sementara untuk RL, YL dan BL dengan RM, YM dan BM bekerja dengan referensi sinyal

gelombang bawah (*lower*) [12]. *Switching* bagian atas (*upper*) dan bawah (*lower*) dapat dilihat pada tabel 3.5. berikut.

Tabel 3.5 Tabel *Switching Nine Switch Inverter*

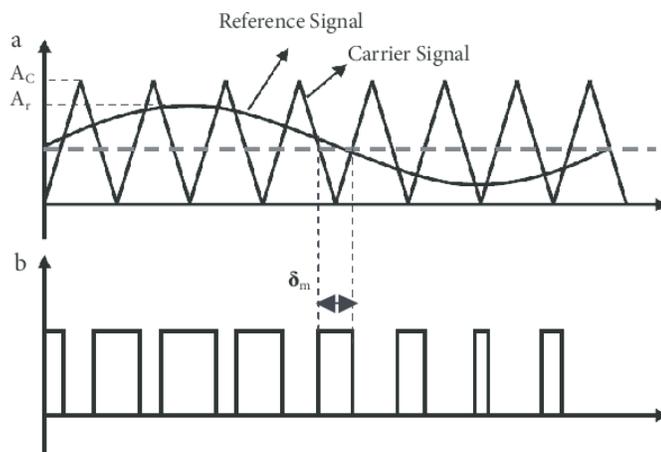
No	Saklar				
	Saklar	R	Y	B	
1	H	0	0	0	<i>Initiate/loop</i>
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	
2	H	1	1	0	<i>Upper Inverter Work</i>
	M	0	0	1	
	L	1	1	1	
3	H	1	0	0	
	M	0	1	1	
	L	1	1	1	
4	H	1	1	0	
	M	0	0	1	
	L	1	1	1	
5	H	0	0	0	<i>Loop</i>
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	
6	H	1	1	1	<i>Lower Inverter Work</i>
	M	1	0	0	
	L	0	1	1	
7	H	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	<i>Loop</i>
	M	1	1	1	
	L	0	0	0	

Nine switch inverter tersusun oleh tiga mosfet pada tiap kakinya. Untuk mencegah terjadi kerusakan ketiga mosfet tidak boleh dalam kondisi *on* secara bersamaan

melainkan hanya boleh dua mosfet saja yang boleh dalam kondisi *on* untuk mencegah terjadinya kerusakan, contohnya saat kaki RH *on*, RM *off* dan RL *on* maka nine switch inverter dapat bekerja namun apabila kaki RH, RM dan RL dalam keadaan *on* ketiganya maka akan terjadi *short circuit* kondisi ini berlaku pada setiap kaki.

3.3.3 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse width modulation (PWM) adalah sebuah metode modulasi lebar pulsa sinyal PWM dengan mengubah frekuensi dan *duty cycle* pada keluaran sinyal. PWM membandingkan sinyal referensi (V_r) dan sinyal *carrier* (V_c) dengan gelombang kotak menuju *gate driver* dengan menggunakan sistem *on* dan *off*. Ketika sinyal referensi (V_r) lebih besar dari sinyal *carrier* (V_c) maka PWM akan berada di posisi *on* kemudian Ketika sinyal *carrier* (V_c) lebih besar dari sinyal referensi (V_r) maka PWM akan berada di posisi *off*.



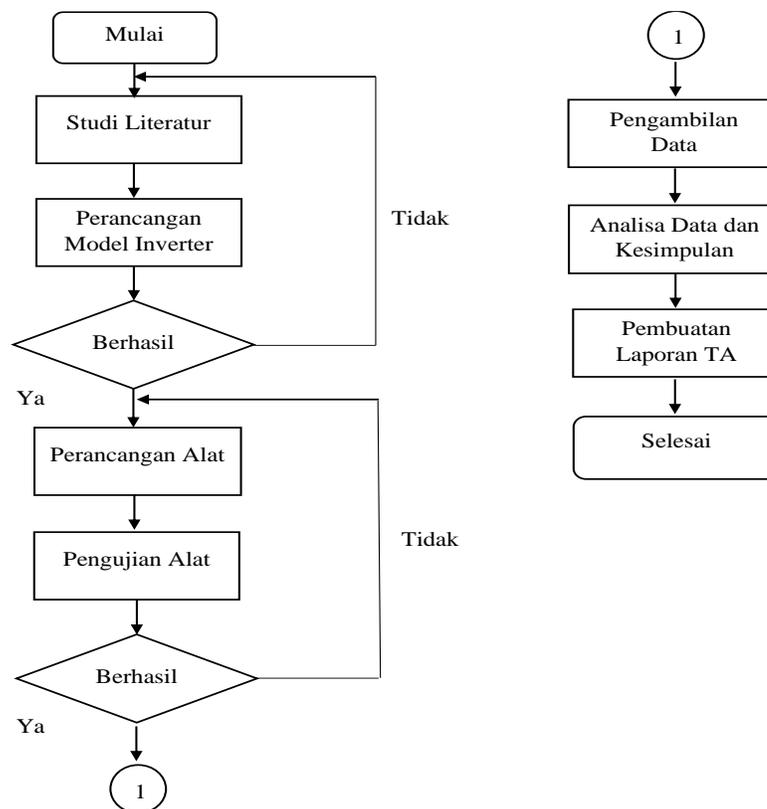
Gambar 3.7 contoh gelombang PWM

Kontrol PWM dapat dilakukan dengan menggunakan program *coding* mikrokontroler, dengan membuat program pada *software* mikrokontroler yang mengatur frekuensi

input, kemudian di lihat hasil dari gelombang pulsa PWM pada osiloskop. Hasil dari gelombang PWM akan di *input* ke mikrokontroler untuk dapat melakukan proses *switching nine switch inverter* yang akan menggerakkan dua motor BLDC.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dimulai dari studi literatur, perancangan model *nine switch inverter*, perancangan rancang bangun alat, pengujian rancang bangun alat dan diakhiri dengan analisa dan pengambilan data hasil. Tahapan dari penelitian ini digambarkan ke dalam diagram alir penelitian sebagai berikut:



Gambar 3.7 Diagram Alir Tahap Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari serangkaian penelitian, pengujian dan analisa yang telah dilakukan pada tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Telah berhasil dirancang pengendali kecepatan dua motor BLDC dengan *nine switch inverter* dan PWM.
2. Kecepatan dua motor BLDC dapat berubah dengan mengatur frekuensinya, semakin tinggi frekuensi semakin tinggi besar kecepatan putar dua motor BLDC.
3. Semakin tinggi frekuensi maka torsi pada dua motor BLDC akan semakin menurun.
4. Penggunaan beban *propeller* mempengaruhi tegangan, arus, kecepatan dan torsi, dimana dua motor BLDC dengan beban *propeller* menghasilkan tegangan, arus, kecepatan dan torsi yang lebih kecil daripada tanpa menggunakan beban.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan adapun saran, Penelitian pengendalian kecepatan dua motor BLDC dengan *nine switch inverter* menggunakan metode *open loop* dapat dikembangkan secara *closed loop*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Kominami and Y. Fujimoto, “A novel three-phase inverter for independent control of two three-phase loads.” IEEE. (2007)
- [2] Rashid, Muhammad H. “*Power Electronics Handbook.*” California: Academic Press – A Hartcourt Science and Technology Company, (2001).
- [3] Jian., Z. and Yangwei, Y. “*Brushless DC Motor Fundamental.*” MPS Proprietary Information AN047. (2011).
- [4] Syifa F. T., Firmansyah E., dan Priyatmadi, “Pengendalian Motor DC Tanpa Sikat Sederhana dengan DSC 16-bit pada Aplikasi EDF”, JNTETI. Vol. 4, No. 4, (2015).
- [5] Akbar D. dan Riyadi S. “Pengaturan Kecepatan Pada Motor *Brushless* DC (BLDC) Menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*).” SNIKO Bandung, 10-11 (2018).
- [6] Novianta M. A. “Analisis Motor Induksi Satu Fasa dengan Metode Cycloconverter berbasis Mikrokontroler AT89C51.” TELKOMIKA. Vol. 5, No. 1, (2007).
- [7] Andika R. J., Rusdinar A., dan Wibowo A. S., “Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali kecepatan motor BLDC berbasis PWM pada mobil listrik.” eProceedings of Engineering. Vol. 5, No. 1, (2018).
- [8] Muhamad A. “Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik.” Yogyakarta: UNY Press (2018).

- [9] Putra S. P., dan Zulwisli. "Inverter PWM Untuk Menggerakkan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat Berbasis Arduino." VOTEKNIKA. Vol. 7, No. 4, (2019).
- [10] Suhendar W. S. dan Koswara E. "Analisis Pengaruh *dutycycle* dan frekuensi Terhadap Kecepatan Motor Listrik." SENASTER Vol. 1, No. 1, (2020).
- [11] Jose R. and V. Reshmi, "A *Nine Switch Z-Source Inverter for Independent Control of Two Three-Phase Motors.*" IJLTET. Vol. 6 Issue 1. (2015).
- [12] Nandankar S. and Goyal G. N. "Simulation Analysis of *Nine Switch Inverter for Induction Motor Drive.*" IJRITCC. Vol. 3, Issue: 2 (2015): 020-024.