

**PENERAPAN ANALOG MODULASI LEBAR PULSA MENGUBAH
DAYA DC KE DAYA AC 3 FASA UNTUK MEMUTAR MOTOR BLDC
TIGA FASA**

(Skripsi)

Oleh

Muhammad Abdullah Umar

1915031062



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**PENERAPAN ANALOG MODULASI LEBAR PULSA MENGUBAH
DAYA DC KE DAYA AC 3 FASA UNTUK MEMUTAR MOTOR BLDC
TIGA FASA**

Oleh

MUHAMMAD ABDULLAH UMAR

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PENERAPAN ANALOG MODULASI LEBAR PULSA MENGUBAH DAYA DC KE DAYA AC 3 FASA UNTUK MEMUTAR MOTOR BLDC TIGA FASA

Oleh

MUHAMMAD ABDULLAH UMAR

Teknologi yang kian pesat berkembang selaras dengan energi yang dikonsumsinya memberi dampak negatif kepada sumber energi listrik konvensional serta mengakibatkan kerusakan lingkungan yang dimana perlunya alternatif energi yaitu energi baru terbarukan (EBT). Energi baru terbarukan ini menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) yang perlu diubah menjadi arus bolak-balik (AC) supaya dapat di distribusikan melalui grid agar bermanfaat kepada masyarakat. Dengan hal ini, hasil energi listrik yang diproduksi EBT dapat di konversi menjadi arus bolak-balik dengan menggunakan alat inverter. Maka penelitian disini adalah untuk simulasi dan membuat alat inverter tiga fasa untuk mengubah energi listrik DC menjadi AC tiga fasa lalu dihubungkan ke motor bldc tiga fasa dengan berbagai frekuensi. Inverter memerlukan sebuah sistem kontrol dalam pensaklaran transistor daya yang krusial dalam konversi energi ini, dimana metode yang digunakan adalah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) yang dimana metode ini membandingkan dua gelombang yaitu gelombang fundamental (sinus) dan gelombang karir (segitiga) dimana hasil dari perbandingan ini yang dipanggil sebagai SPWM yang nantinya digunakan untuk pensaklaran transistor daya pada inverter. Keluaran dari inverter disambungkan ke motor bldc tiga fasa lalu diukur kecepatannya menggunakan tachometer serta frekuensi yang dikeluarkan dapat divariasikan dengan mengatur frekuensi gelombang fundamental dengan menggunakan mikrokontroler. Konklusi yang dapat diambil dari penelitian ini mendemonstrasikan bahwa kecepatan pada kecepatan motor bldc tiga fasa yang mana berbanding lurus terhadap frekuensi.

Kata kunci : inverter tiga fasa, motor bldc, *sinusoidal pulse width modulation*

ABSTRACT**APPLICATION OF ANALOG PULSE WIDTH MODULATION
CONVERTS DC POWER TO 3 PHASE AC POWER TO ROTATE A
THREE PHASE BLDC MOTOR****By****MUHAMMAD ABDULLAH UMAR**

Technology that is increasingly developing rapidly in line with the energy it consumes has a negative impact on conventional electrical energy sources and causes environmental damage, which requires alternative energy, namely new renewable energy (EBT). This new renewable energy produces electrical energy in the form of direct current (DC) which needs to be converted into alternating current (AC) so that it can be distributed through the grid to benefit society. With this, the electrical energy produced by EBT can be converted into alternating current using an inverter. So the research here is to simulate and create a three-phase inverter to convert DC electrical energy into three-phase AC and then connect it to a three-phase bldc motor with various frequencies. Inverters require a control system for switching power transistors which are crucial in this energy conversion, where the method used is Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) where this method compares two waves, namely the fundamental wave (sine) and the carrier wave (triangle) which is the result of This comparison is called SPWM which will later be used for switching power transistors in the inverter. The output from the inverter is connected to a three-phase bldc motor and its speed is measured using a tachometer and the output frequency can be varied by adjusting the fundamental wave frequency using a microcontroller. The conclusion that can be drawn from this research demonstrates that the speed of a three-phase bldc motor is directly proportional to frequency.

Keywords: three-phase inverter, bldc motor, sinusoidal pulse width modulation

Judul Skripsi : PENERAPAN ANALOG MODULASI
LEBAR PULSA MENGUBAH DAYA
DC KE DAYA AC TIGA FASA UNTUK
MEMUTAR MOTOR BLDS TIGA FASA

Nama Mahasiswa : Muhammad Abdullah Umar

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031062

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



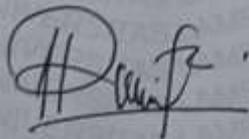
Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP. 196311141999031001

Syaiful Alam, S.T.,M.T.
NIP. 196904161998031004

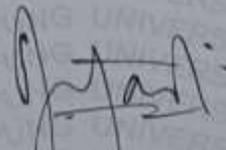
2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001

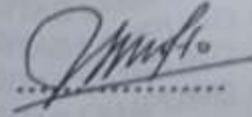


Supadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001

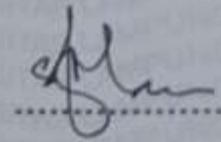
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

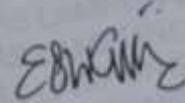
Ketua : Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.



Sekretaris : Syaiful Alam, S.T.,M.T.



Penguji : Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 01 April 2024

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana), baik di Universitas Lampung maupun perguruan tinggi lainnya. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dari Komisi Pembimbing. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah yang tertulis dalam daftar Pustaka.

Maka atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran, saya bersedia untuk menanggung akibat dan sanksi sesuai norma yang telah berlaku di perguruan tinggi.

Bandar Lampung, 7 Agustus 2024

Demi buat Pernyataan,



Muhammad Abdullah Umar
NPM 1915031062

MOTTO

“Maka, sesungguhnya berserta kesulitan ada kemudahan, Sesungguhnya berserta kesulitan ada kemudahan”

(Q.S Al-Insyirah 5-6)

“Jangan sesekali mengira, bahwa Allah itu lengah dari apa yang diperbuat orang zalim. Sesungguhnya Allah menanggihkan mereka sampai hari yang pada waktu itu mata (mereka) terbelalak”

(Q.S Ibrahim 42)

“Kalau aku mati saat ini maka dosaku berhenti disini, kalau aku hidup esok maka pahalaku ikut bertambah”

(Ustadz Abdul Somad)

Riwayat Hidup

Muhammad Abdullah Umar adalah lama lengkap yang diberikan oleh orang tua penulis, lahir pada tanggal 30 desember 2001 di Tangerang dan merupakan anak ke enam dari delapan bersaudara.

Penulis dibesarkan diluar negri yaitu di Pahang, Malaysia dikarenakan pekerjaan bapak Penulis sebagai Dosen di *University Malaysia Pahang* (UMP). Penulis menamatkan pendidikan formal Sekolah Dasar (SD) Al-Irsyad dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di Kuantan, Pahang Malaysia.

Berpulang ke Indonesia, penulis melanjutkan pembelajaran di Bimbingan Belajar Nurul Fikri selama 4 bulan untuk persiapan UTBK dan diterima sebagai mahasiswa di jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung pada tahun 2019. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) khususnya dalam divisi Pendidikan dan penulis juga berperan sebagai asisten lab di Lab Konversi Unila.

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan berjudul “Penerapan Analog Modulasi Lebar Pulsa mengubah Daya DC ke Daya AC Tiga Fasa untuk Memutar Motor BLDC Tiga Fasa” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Abi dan Ummi yang tidak pernah lelah memberikan motivasi serta nasihat kehidupan mau di dunia dan di akhirat
2. Bang dedi, kak dati, kak aini, kak nia, kak dede, bebi dan amira yang banyak sekali membantu dalam kehidupan penulis untuk menjadi pribadi yang lebih baik.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung;
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
5. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
6. Bapak Sumadi S.T., M.T., selaku Kepala Prodi Teknik Elektro Universitas Lampung;
7. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, dan arahan.

8. Bapak Syaiful Alam S.T., M.T., selaku pembimbing pendamping dan pembimbing akademik yang telah memberi arahan dan nasihat kepada penulis dengan baik selama penulisan skripsi ini maupun perkuliahan
9. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran serta masukan yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini;
10. Segenap Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis;
11. Segenap staff Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal lainnya;
12. Eternity 19, teman seperjuangan Power 19, asisten lab konversi, kakak-kakak,serta adik-adik tingkat yang telah menjadi teman seawall perkuliahan penulis.
13. Teman kontrakan perumahan teknik dimas, novan, berto, dan adam.
14. Semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian skripsi ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL.....	i
DAFTAR GAMBAR	i
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan	2
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
1.6. Hipotesis	4
1.7. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Baterai.....	5
2.2. Inverter	6
2.3. Pengaplikasian MOSFET	6
2.4. <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM).....	8
2.5. <i>Gate Driver</i>	11
2.6. Mikrokontroler	11
2.7. <i>Digital to Analog Converter</i>	12
2.8 Motor Tiga Fasa BLDC.....	13
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2. Alat dan Bahan	15
3.3. Aliran Penelitian dan Diagram Blok	16
3.4. Diagram Blok Perancangan Alat	17
3.5. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)	18
3.6. Simulasi Inverter SPWM.....	18
3.7. Rangkaian Pembangkit Sinus Tiga Fasa	20
3.8. Rangkaian Pembangkit Gelombang Segitiga	21

3.9.	Komparator.....	22
3.10.	<i>Gate Driver</i>	23
3.11.	<i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)</i>	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1.	Pengantar	25
4.2.	Pembangkit gelombang sinusoid	25
4.2.1.	Gelombang Sinus fasa 1 dan fasa 2.....	26
4.2.2.	Gelombang Sinus fasa 1 dan fasa 3.....	27
4.2.3.	Gelombang sinuoidal fasa 2 dan fasa 3.....	27
4.3.	Pembangkit Gelombang Segitiga	28
4.4.	Komparator dan <i>not gate</i>	31
4.4.1.	Hasil sinyal komparator dan <i>Not Gate</i>	32
4.5.	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) Driver</i> 34	
4.6.	Rangkaian Mosfet.....	37
4.7.	<i>Total Harmonic Distortion (THD) pada output.</i>	39
4.7.1	<i>Total harmonic distortion (THD) pada frekuensi 30Hz</i>	39
4.7.2	<i>Total harmonic distortion pada frekuensi 40Hz.</i>	41
4.7.3	<i>Total harmonic distortion pada frekuensi 50Hz</i>	44
4.7.4	<i>Total harmonic distortion pada frekuensi 60Hz</i>	47
4.7.5	<i>Total harmonic distortion pada frekuensi 70Hz</i>	49
4.7.6	Tabel dan grafik korelasi frekuensi dan total harmonics distortion pada output. 52	
4.8	Hubungan antara frekuensi dan kecepatan pada motor tiga fasa bldc.....	54
5.1.	Kesimpulan	56
5.2.	Rekomendasi	56
DAFTAR PUSTAKA		57

DAFTAR TABEL

Tabel. 1 Perbandingan gelombang	31
Tabel.2 Frekuensi dan total harmonic distortion.....	52
Tabel.3 Hubungan frekuensi dan kecepatan pada motor tiga fasa blds secara praktis dan teori.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian inverter 3 fasa	7
Gambar 2.2 Skema Pembentukan Sinyal PWM.....	8
Gambar 2.3 Sinyal Komparator	9
Gambar 2.4 Metode Pembangkitan PWM 3 Fasa	10
Gambar 2.5 Arduino Uno R3	12
Gambar 2.6 Prinsip Kerja Digital to Analog Converter.....	13
Gambar 2.7 Motor tiga fasa bldc (A2212)	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	16
Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Alat	17
Gambar 3.3 Blok simulasi inverter spwm	18
Gambar 3.4 Blok sistem control.....	19
Gambar 3.5 Perbandingan gelombang sinus dan segitiga.....	19
Gambar 3.6 Hasil simulasi keluaran inverter	20
Gambar 3.7 Proteus 8 Professional	20
Gambar 3.8 Skematik Diagram Pembangkit Gelombang Sinus Tiga Fasa.....	21
Gambar 3.9 Skematik Diagram Pembangkit Gelombang Segitiga	22
Gambar 3.10 Skematik Diagram Komparator.....	23
Gambar 3.11 Tipikal koneksi pada IR2110 Gate Driver	24
Gambar 3.12 Mosfet.....	24
Gambar 4.1 Pembangkit Sinus Tiga fasa	26
Gambar 4.2 Gelombang Sinus fasa 1 dan fasa 2.....	26
Gambar 4.3 Gelombang Sinus fasa 1 dan fasa 3.....	27
Gambar 4.4 Gelombang Sinus fasa 2 dan fasa 3.....	28
Gambar 4.5 Pembangkit Gelombang Segitiga	29
Gambar 4.6 Gelombang segitiga	29
Gambar 4.7 Komparator dan Not Gate	32
Gambar 4.8 Sinyal komparator dan not gate pada fasa 1.....	33

Gambar 4.9 Sinyal komparator dan not gate pada fasa 2.....	33
Gambar 4.10 Sinyal komparator dan not gate pada fasa 3.....	34
Gambar 4.11 IR2110 dan Bootstrap Capactors.....	35
Gambar 4. 12 Sinyal high side dan low side fasa 1.....	36
Gambar 4.13 Sinyal high side dan low side fasa 2.....	36
Gambar 4. 14 IR2110 H-Bridge dan Rangkaian MOSFET	38
Gambar 4.15 Tegangan MOSFET Line-to-Line dari Vab	38
Gambar 4.16 Harmonisa kedua pada frekuensi 30Hz.....	39
Gambar 4.17 Harmonisa ketiga pada frekuensi 30Hz.....	40
Gambar 4.18 Harmonisa keempat pada frekuensi 30Hz.....	40
Gambar 4.19 Harmonisa kedua pada frekuensi 40Hz.....	42
Gambar 4.20 Harmonisa ketiga pada frekuensi 40Hz.....	42
Gambar 4.21 Harmonisa keempat pada frekuensi 40Hz.....	43
Gambar 4.22 Harmonisa kedua pada frekuensi 50Hz.....	44
Gambar 4.23 Harmomnisa ketiga pada frekuensi 50Hz	45
Gambar 4.24 Harmonisa keempat pada frekuensi 50Hz.....	45
Gambar 4.25 Harmonisa kedua pada frekuensi 60Hz.....	47
Gambar 4.26 Hamornisa ketiga pada frekuensi 60Hz.....	48
Gambar 4.27 Hamornisa keempat pada frekuensi 60Hz.....	48
Gambar 4.28 Harmonisa kedua pada frekuensi 70Hz.....	50
Gambar 4.29 Harmonisa ketiga pada frekuensi 70Hz.....	50
Gambar 4.30 Harmonisa keempat pada frekuensi 70Hz.....	51
Gambar 4.31 Grafik korelasi frekuensi dan total harmonic distortion.....	53
Gambar 4.32 Grafik hubungan antara frekuensi dan kecepatan pada motor tiga fasa bldc.....	55

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam dekade terakhir ini, populasi manusia meningkat dengan drastis serta permintaan akan listrik meningkat secara eksponensial dari hari ke hari. Sumber energi baru terbarukan (EBT) merupakan solusi yang digunakan pada banyak negara sebagai alternatif energi listrik yang ramah lingkungan. Dimana pengembangan teknologi yang disebut sebagai inverter digunakan dengan mengubah hasil energi EBT yaitu dari energi listrik DC menjadi energi listrik AC. Energi listrik DC yang dihasilkan akan di simpan pada baterai lalu dikonversi menjadi energi listrik AC dengan menggunakan inverter yang mana hasil konversi tersebut di teruskan ke jaringan listrik untuk di distribusikan. Sebagian besar peneliti telah menemukan banyak jenis teknik modulasi. Salah satu teknik modulasi paling populer adalah modulasi lebar pulsa (PWM) [1]. Ini dapat mengontrol sensor analog dengan output digital.

Pada tahun 1945 terdapat banyak sistem jaringan distribusi listrik DC ke DC yang di implementasikan di seluruh dunia dimana beberapa peralatan seperti alat daya, radio, TV yang berkerja dengan menggunakan sumber daya AC tidak dapat digunakan [1]. Maka dengan ini, masyarakat mengalami beberapa permasalahan yang mana dunia tidak bisa bekerja dengan hanya menggunakan satu jenis sumber daya. Maka karna itu, ia menjadi hal yang vital perlunya kemudahan dalam memproduksi energi listrik yang dapat mengubah dari daya DC ke daya AC dimana alat tersebut adalah inverter.[2]

Selain itu, pengembangan penggerak motor yang memiliki performa tinggi merupakan suatu faktor penting dalam aplikasi industri serta tujuan lain seperti pabrik penggulung baja, mobil listrik, penerbangan dan robotika. Beberapa jenis

motor listrik yang diusulkan untuk digunakan dalam pengaplikasian ini dan salah satunya adalah motor DC memiliki karakteristik yang sangat baik [3]. Motor *brushless* DC luas digunakan dalam aplikasi industri yang mana memiliki kelebihan yang berbeda berbanding motor konvensional lainnya seperti memiliki karakteristik kecepatan dan torsi, respon dinamika yang lebih baik, efisiensi tinggi, julat kecepatan yang luas dan rasio berat-torsi yang tinggi [4]. Berbeda dengan motor dc konvensional, motor bldc ini tidak memiliki sikat, maka komutasi bekerja secara elektronik dan motor bldc ini memiliki bentuk yang mirip dengan motor sinkron tiga fasa dikarenakan oleh permanen magnet.

Selanjutnya, peningkatan distorsi harmonisa yang disebabkan oleh kelebihan dalam menggunakan beban nonlinear seperti pengaturan kecepatan motor, sistem sumber daya, sistem pengisi baterai dan lain-lain. Dimana peralatan tersebut menyumbang arus harmonisa pada power sistem dan menyebabkan distorsi harmonisa yang mengakibatkan meningkatnya malfungsi pada peralatan yang sensitif atau mengganggu sistem komunikasi [5].

Sehingga pada penelitian ini, pembangkitan modulasi lebar pulsa atau *pulse width modulation* dibangkitkan secara analog untuk melakukan pensaklaran pada transistor daya. Maka, penelitian ini, mengubah sumber baterai atau sumber dc lainnya yang akan menjadi arus listrik bolak-balik lalu digunakan untuk memutar motor bldc tiga fasa. Demikian berdasarkan latar belakang ini, penulis mengangkat judul “Penerapan Analog Modulasi Lebar Pulsa Mengubah Daya DC Menjadi Daya AC 3 Fasa Untuk Memutar Motor BLDC Tiga Fasa”.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Menghasilkan output tegangan AC tiga fasa.
2. Menghitung *total harmonic distortion* pada output dengan berbagai frekuensi.
3. Perubahan pada frekuensi menghasilkan perubahan pada kecepatan motor.

1.3. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sistem AC yang banyak digunakan maka modul surya yang menghasilkan sumber DC harus diubah menjadi AC.
2. Baik teknis atau ekonomis tidak bisa dibangun sistem AC pada daerah 3T yaitu daerah tertinggal, terpececil dan terluar.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sinyal Sinus yang diprogram menggunakan *Arduino Microcontroller* menggunakan bahasa C.
2. Konversi sumber tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa.
3. Tegangan AC tiga fasa untuk memutar motor tiga fasa bldc.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa.
2. Tegangan AC tiga fasa yang dapat dimanfaatkan seperti menggerakkan motor tiga fasa

1.6. Hipotesis

Pada penelitian ini diharapkan dapat mengubah sumber DC dari modul surya menjadi sumber daya AC tiga fasa dengan pembangkitan sinyal modulasi lembar pulsa.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian yang digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut :

1. PENDAHULUAN

Membahas tentang latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan Pustaka ini memaparkan secara umum tentang referensi materi yang diperoleh dari berbagai sumber buku, jurnal dan penelitian ilmiah dan beberapa teori yang digunakan untuk penulisan laporan tugas akhir ini.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memuat waktu dan tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menganalisa dan memaparkan hasil data dari penelitian sebagai pembahasan dari penelitian ini.

5. KESIMPULAN

Pada bab ini, akan menjelaskan kesimpulan dan saran yang diperuntukkan dari hasil data pembahasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baterai

Di tengah perubahan iklim yang semakin nyata dan tekanan untuk beralih ke sumber energi yang lebih berkelanjutan, energi terbarukan telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk menyeimbangkan kebutuhan energi manusia dengan perlindungan lingkungan. Dalam perjalanan menuju masa depan yang lebih hijau, baterai memainkan peran sentral dalam menyimpan dan mendistribusikan energi dari sumber terbarukan, sementara juga menjaga keandalan dan kontinuitas pasokan energi.

peran vital baterai sebagai penyimpan energi cadangan dan sumber dalam teknologi modern, dengan penekanan khusus pada sumber energi baru terbarukan. Baterai memungkinkan energi yang dihasilkan dari sumber-sumber terbarukan untuk disimpan saat produksi melampaui kebutuhan dan dilepaskan saat produksi turun di bawah kebutuhan, memastikan pasokan energi yang stabil dan dapat diandalkan. Baterai juga memainkan peran penting sebagai sumber energi dalam teknologi modern saat ini. Dalam berbagai aplikasi, dari perangkat portabel hingga kendaraan listrik, baterai memberikan daya yang dibutuhkan untuk memastikan mobilitas dan keterhubungan kita. Misalnya, dalam industri transportasi, baterai kendaraan listrik menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber daya utama, mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara yang merugikan lingkungan.

2.2. Inverter

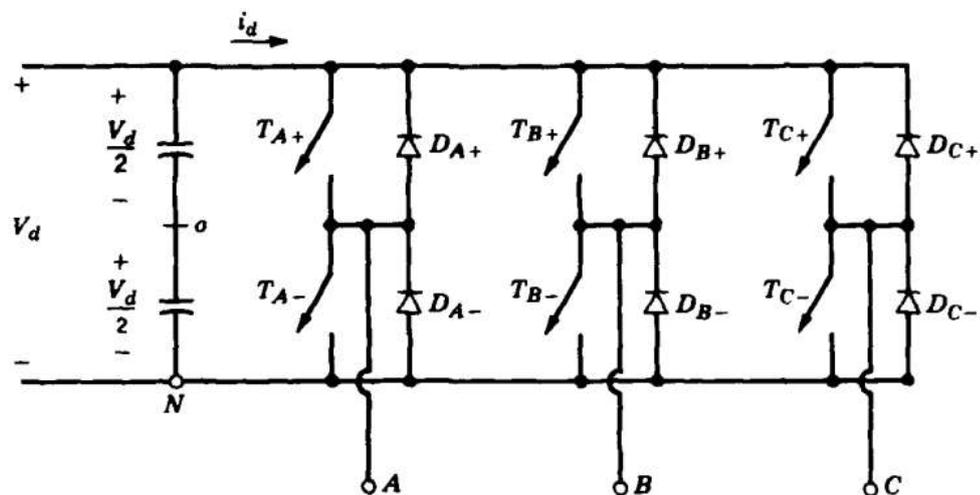
Perkembangan teknologi yang pesat dalam kurun dekade ini memperlihatkan bahwa semakin banyak mengandalkan perangkat elektronik dan sumber alternatif yaitu energi baru terbarukan (EBT), inverter yang memiliki peran penting dalam memfasilitasi konversi daya yang memerlukan sistem arus bolak balik. Dimana inverter memungkinkan integrasi energi baru terbarukan hingga memberi sumber kepada perangkat elektronik. Secara umum, inverter adalah perangkat elektronik untuk mengkonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC), konversi ini vital dikarenakan perangkat listrik yang beroperasi pada arus AC, seperti sistem penyimpanan energi dimana baterai yang menyimpan arus searah dapat digunakan sebagai cadangan energi yang dikonversi serta digunakan pada sistem arus bolak-balik.

Inverter memiliki prinsip fundamental yaitu dengan mengubah arus searah menjadi arus bolak balik yang secara periodik membalikkan arah. Perubahan ini terjadi melalui beberapa komponen elektronik dan proses modulasi elektronik untuk mengubah arah dan memberikan output gelombang ac yang kompatibel terhadap perangkat yang beroperasi AC. Perangkat utama dalam perubahan ini adalah komponen pingsaklaran dimana digunakan dengan cepat untuk mematikan atau menghidupkan input DC dan mengubah bentuk output serta polaritas secara bergantian.

2.3. Pengaplikasian MOSFET

Inverter adalah rangkaian atau komponen yang digunakan untuk mengubah tegangan DC (searah) menjadi AC (bolak-balik) dengan gelombang Sinus dimana lebih tepatnya mengkonversi tegangan dari sumber DC ke beban AC dan arus AC-nya memiliki komponen fundamental dengan frekuensi dan amplitude yang dapat divariasikan. Inverter yang *Total Harmoniac Distortion* (THD) yang kecil dibawah 5%[14]. baik, adalah inverter yang memiliki Contoh sumber tegangan inverter

dapat berupa baterai, Panel Surya dan sumber DC lainnya. Secara umum, komponen utama yang digunakan dalam rangkaian inverter, biasanya memerlukan komponen semikonduktor pensaklaran berupa IGBT, MOSFET, TRIAC maupun SCR. Pada rangkaian inverter 3 fasa, memerlukan 6 komponen semi konduktor membuat *bridge* inverter 3 fasa, diperlihatkan pada gambar 2.2 rangkaian inverter 3 fasa.

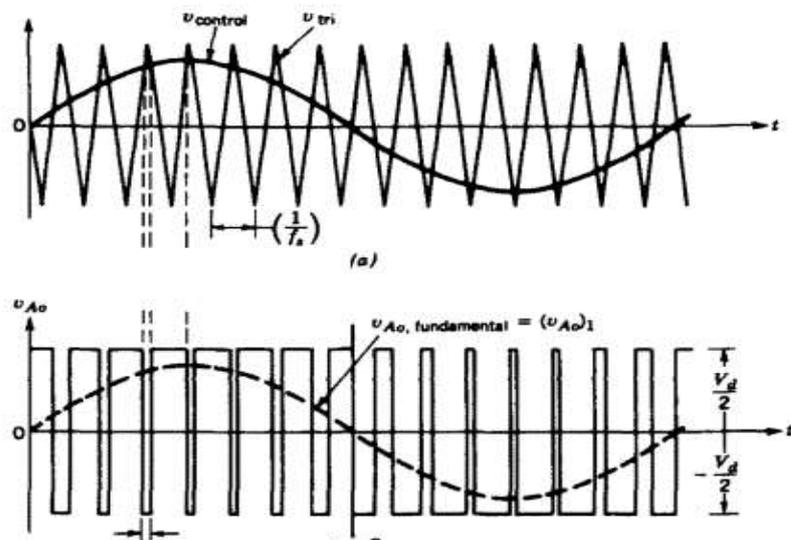


Gambar 2.1 Rangkaian inverter 3 fasa

Berdasarkan gambar 2.2, dimisalkan komponen semikonduktor yang digunakan adalah MOSFET, maka kaki *drain* MOSFET S1 terhubung ke terminal positif pada sumber DC dan kaki *source* MOSFET S1 terhubung ke kaki *drain* MOSFET S4. Begitu pula pada MOSFET S3 dengan MOSFET S6, dan MOSFET S5 dengan MOSFET S2. Maka dengan pertemuan kaki *source* MOSFET dengan kaki *drain* MOSFET lainnya akan menghasilkan terminal untuk fasa. Dapat dilihat pada gambar 2.2 bahwa fasa A dihasilkan dari pensaklaran MOSFET S1 dan MOSFET S4, fasa B dihasilkan dari pensaklaran MOSFET S3 dengan S6, dan fasa C dihasilkan dari pensaklaran MOSFET S5 dengan S2 [14].

2.4. Pulse Width Modulation (PWM)

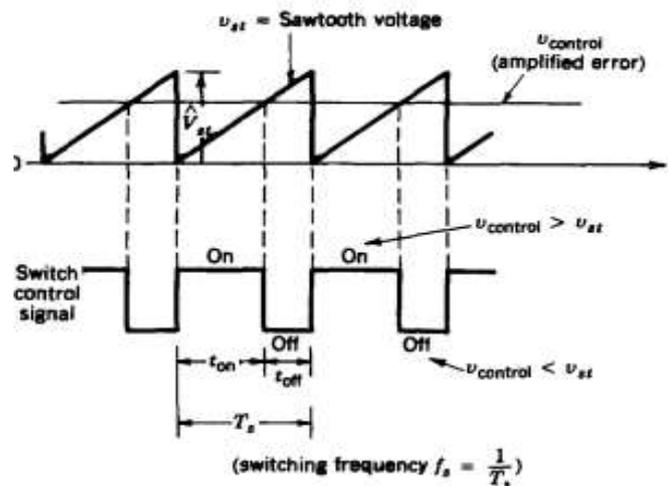
Metode *pulse width modulation* (PWM) atau modulasi lebar pulsa digunakan untuk menghasilkan gelombang pulsa yang dapat dirubah sesuai dengan perubahan yang digunakan berupa gelombang Sinus. Pada metode ini merupakan suatu Teknik yang membandingkan sinyal *reference* (V_r) dengan sinyal *Carrier* (V_c) digunakan komparator. Beberapa contoh pengimplementasian PWM adalah pengontrolan daya, regulator tegangan, pemodulasian data untuk telekomunikasi, penguatan serta aplikasi-aplikasi lainnya. Prinsip kerja PWM adalah mengatur lebar pulsa yang mengikuti gelombang Sinus dimana komparator digunakan untuk membandingkan gelombang Sinus dan gelombang segitiga. Apabila nilai tegangan Sinus lebih besar dari tegangan segitiga maka *output* komparator akan bernilai 1 atau *high*. Namun jika tegangan Sinus lebih kecil dari tegangan segitiga maka *output* komparator akan bernilai 0 atau *low*[15].



Gambar 2.2 Skema Pembentukan Sinyal PWM

Proses membandingkan memodulasikan sinyal *carrier* yaitu digunakan sinyal sinus dengan amplitud dan frekuensi maksimum. Frekuensi sinyal segitiga tidak boleh

lebih besar dibandingkan dengan gelombang *carrier*, gelombang pemodulasi (sinyal sinus) dimana perbandingan ini disebut sebagai indeks modulasi amplitude [16].



Gambar 2.3 Sinyal Komparator

T_{on} pada gambar 2.4 menunjukkan lama waktu tegangan keluaran berada di posisi *high* atau *on* sedangkan T_{off} merupakan lama waktu tegangan keluaran berada di posisi *low* atau *off*. Penjumlahan lama waktu dari T_{on} dengan T_{off} disebut dengan T_{total} yang biasa dikenal dengan satu perioda gelombang.

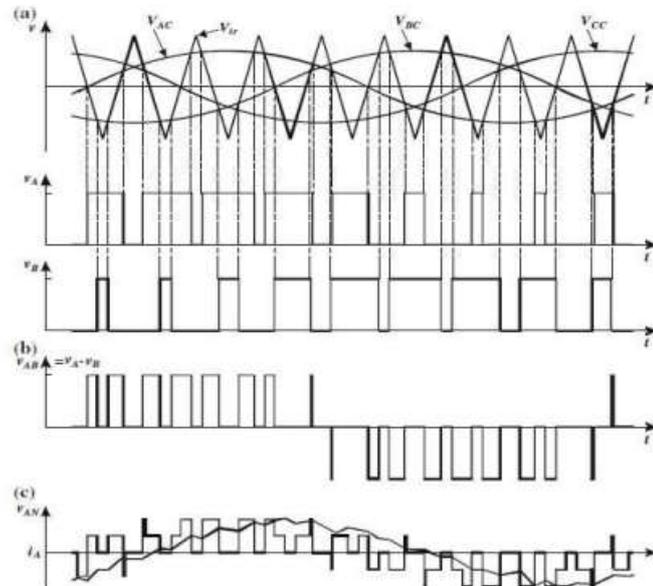
$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad 2.2$$

Dari besarnya T_{on} dan T_{off} ini maka dapat ditentukan besarnya *duty cycle* yaitu perbandingan antara 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 ditulis seperti pada persamaan di bawah ini.

$$Duty\ Cycle = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \quad 2.3$$

Duty cycle inilah yang akan menentukan waktu kerja pada komponen saklar semikonduktor sehingga akan menjadi pulsa penyalan yang mengontrol keadaan *on* dan *off* pada saklar. Oleh karena itu prinsip kerja dari PWM untuk mengontrol kerja dari saklar semikonduktor adalah ketika $V_{control} / V_{ref}$ memiliki amplitudo

lebih besar dari gelombang segitiga maka PWM akan mengeluarkan kondisi *high* yang menyebabkan saklar dalam keadaan *on* sehingga saklar menutup, sebaliknya



Gambar 2.4 Metode Pembangkitan PWM 3 Fasa

Inverter tiga fasa merupakan suatu komponen elektronika yang berkerja untuk mengkonversi tegangan dan arus DC menjadi tegangan dan arus AC tiga fasa [17]. Berdasarkan gambar diatas dapat diperhatikan untuk menghasilkan sinyal PWM 3 fasa maka diperlukan tiga sinyal referensi Sinus dan satu sinyal *carrier triangular*, yang mana pada tiap sinyal referensi dibandingkan dengan sinyal *triangular* menggunakan komparator. Jika nilai sinyal referensi lebih besar nilainya daripada sinyal segitiga, maka output PWM akan bernilai *high* sebaliknya maka bernilai *low*. Inverter ini beroperasi dengan frekuensi dari sinyal *carrier*, oleh karena ini komponen semikonduktor saklar ini harus memiliki spesifikasi dengan frekuensi tinggi. Pembangkitan sinyal PWM secara digital, dapat menggunakan sebuah mikrokontroller dengan menggunakan metode pemrograman atau kodingan.

2.5. *Gate Driver*

Komponen elektronika yaitu *Gate Driver* merupakan sebuah rangkaian elektronika yang memiliki fungsi sebagai gerbang (pemisah) antara saklar daya dengan *microcontroller*. *Gate Driver* ini juga digunakan sebagai penguat tegangan input yang kecil dari sebuah *microcontroller* sehingga menghasilkan tegangan input yang lebih besar maka dapat memicu aktifnya saklar daya serta memenuhi syarat untuk mengaktifkan *gate* pada saklar daya dan akan terjadinya pensaklaran[18]. Misalnya, *Gate Driver* dapat digunakan sebagai penguat tegangan dari *microcontroller* yang nilai outputnya sebesar 3.3V atau 5V menjadi lebih besar dan sesuai dengan tegangan yang diperlukan untuk memicu *gate* pada saklar daya yang nilainya bervariasi. Oleh karena itu, *Gate Driver* diperlukan terutamanya pada rangkaian konversi daya seperti *inverter*, *rectifier*, dan DC-DC konversi seperti *buck*, *boost*, dan *buck boost* konverter.

2.6. **Mikrokontroler**

Mikrokontroler merupakan suatu rangkaian terpadu elektronik yang berfungsi sebagai pengendali yang mengatur jalannya proses kerja dari suatu rangkaian elektronik. Dimana Arduino adalah perangkat mikrokontroler yang bersifat *open source*, dan Arduino juga modul mikrokontroler yang sangat populer saat ini, terdapat berbagai macam jenis Arduino dengan sesuai kebutuhan. Pemrograman Arduino menggunakan bahasa pemrograman tersendiri. Arduino memiliki peran penting dalam pengontrolan berbagai macam perangkat dan rangkaian elektronik, maupun pengendalian berbagai macam motor [18].



Gambar 2.5 Arduino Uno R3

(Sumber : <https://www.arduinoindonesia.id/> 18 Agustus 2022)

2.7. *Digital to Analog Converter*

Pada Teknologi sekarang, dimana pengkonversian informasi digital ke sinyal analog memiliki peran yang penting dalam berbagai bidang, dari produksi audio hingga telekomunikasi. Inti dari transformasi ini ada pada *digital to analog converter* (DAC), sebuah komponen fundamental yang menyebrangi ruang diantara dunia biner (*digital information*) dan sinyal analog.

DAC merupakan perangkat elektronik yang mengubah data digital, biasanya dalam bentuk kode biner menjadi sinyal analog. Dimana tujuan utamanya adalah untuk membuat ulang bentuk gelombang yang diberikan dari data digital, yang memungkinkan transmisi atau reproduksi informasi dalam format analog. Prinsip kerja DAC secara umum adalah *sampling* dan rekonstruksi. Dimana *sampling* merupakan input sinyal digital yang di sampel pada interval regular. Sinyal digital yang berisi dalam nilai biner (0 dan 1) merupakan representasi dari sample diskrit pada sinyal analog. Rekonstruksi adalah sebuah proses apabila DAC mengkonstruksi ulang dari sampel diskrit ke gelombang analog yang diinginkan, ini merupakan proses konversi setiap nilai biner yang koresponding pada tegangan atau arus analog.



Gambar 2.6 Prinsip Kerja *Digital to Analog Converter*

(Sumber: www.electricaltechnology.org)

2.8 Motor Tiga Fasa BLDC

Motor BLDC (*Brushless DC*) tiga fasa adalah jenis motor listrik yang beroperasi menggunakan suplai daya tiga fasa dimana motor ini juga dikenal sebagai motor listrik *synchronous AC* 3 fasa. Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak menggunakan *brush*. Selain itu, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibanding motor induksi karena rotor dan torsi awal yang besar disebabkan oleh rotor terbuat dari magnet permanen serta kecepatan pada motor ini dapat divariasikan dengan mengubah frekuensi atau *duty cycle*[19]. *Duty cycle* (D) yang mana bisa dipresentasikan dengan rumus $D = (T_{on}/T_{total}) * 100\%$, Sudut penyalan pada motor bldc merujuk pada posisi relatif dari medan magnet stator terhadap rotor saat arus dialirkan ke belitan motor., peralatan automasi industri dan instrumentasi. Dimana kecepatan pada motor BLDC tiga fasa ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah.

Estimasi kecepatan,

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

N_s : Kecepatan motor tiga fasa bldc

f : Frekuensi pada output daya tiga fasa

p : Jumlah kutub pada motor tiga fasa bldc



Gambar 2.7 Motor tiga fasa bldc (A2212)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

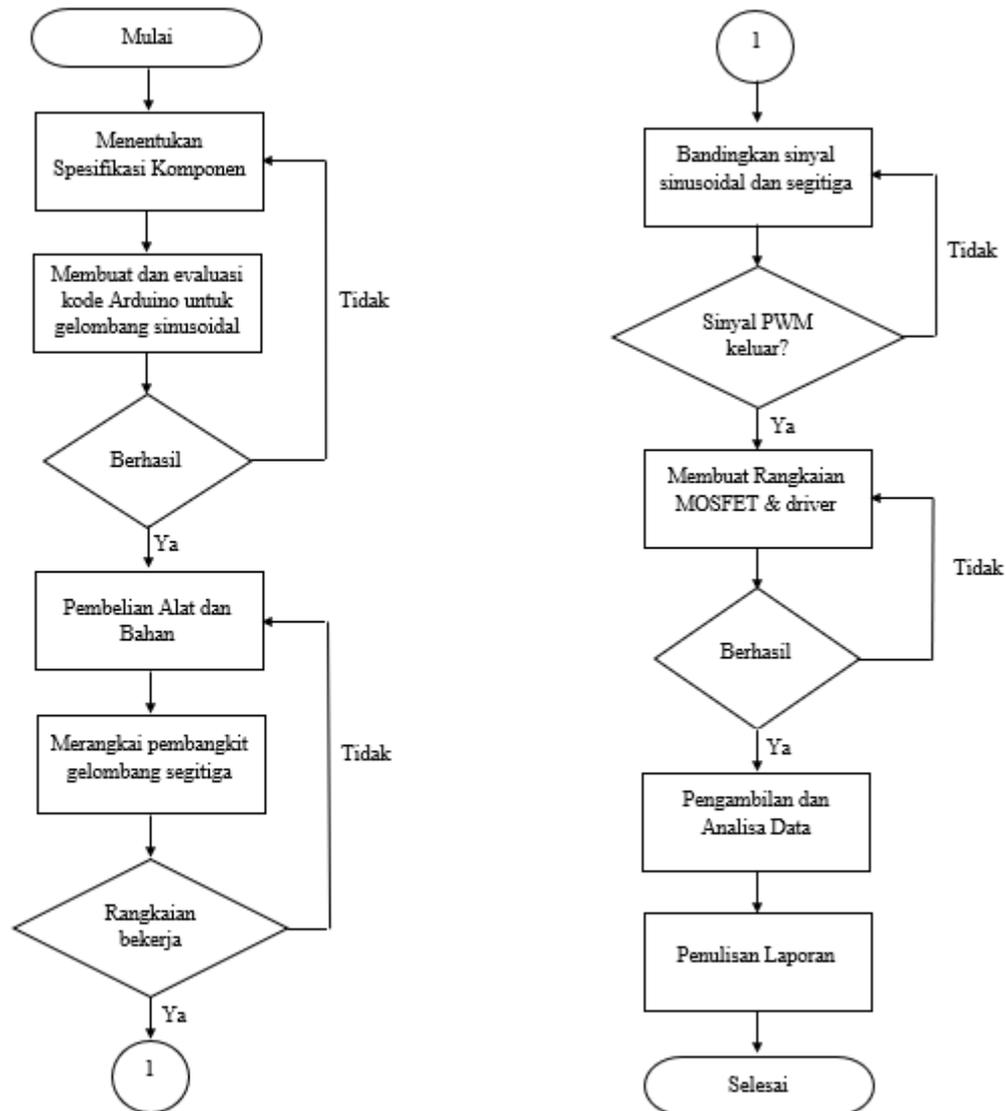
Waktu dan tempat penelitian dimulai sejak pada bulan November 2022 sampai dengan Juni 2023 bertempat di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Unila, Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

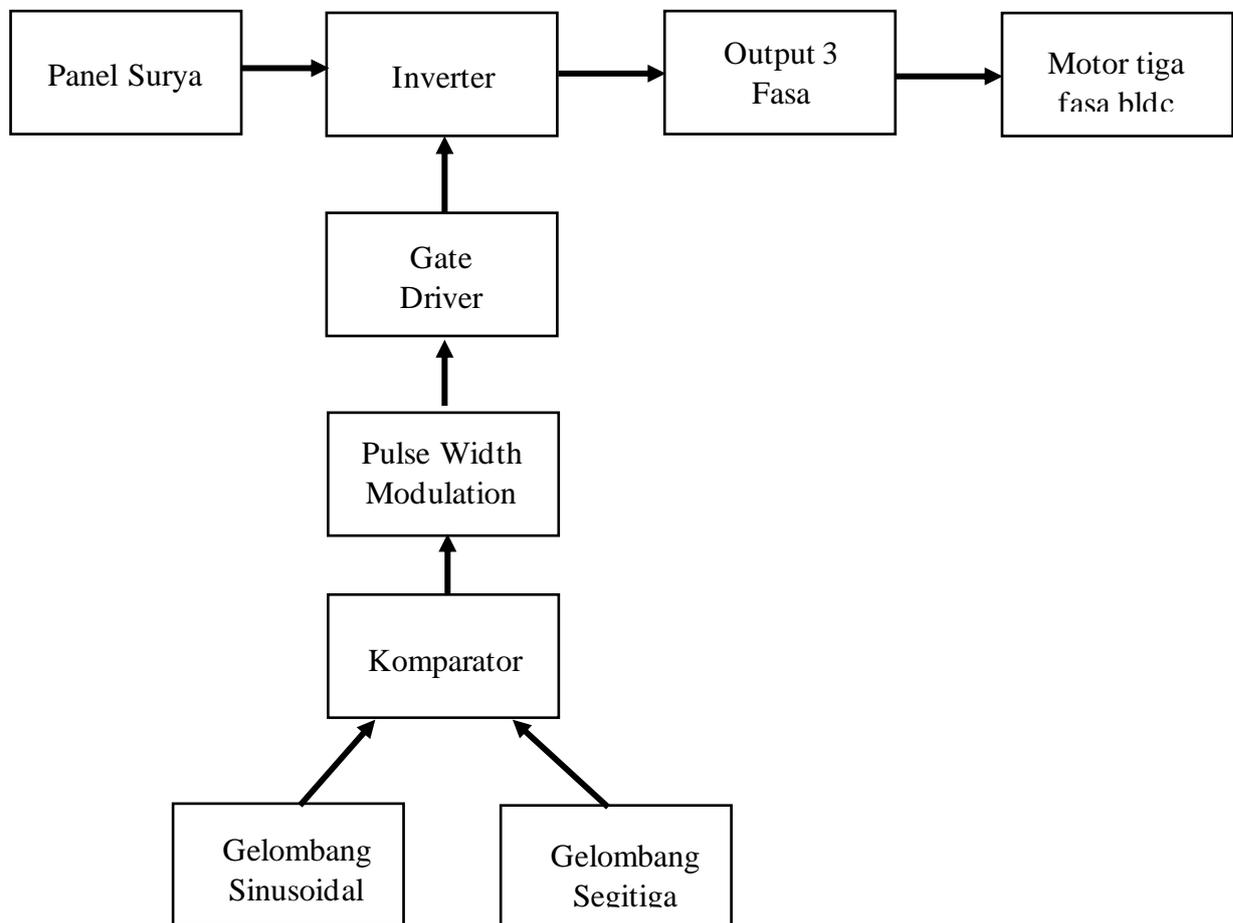
1. Laptop *Hewlett-Packard* (HP)
2. Arduino UNO
3. DAC MCP4725
4. Multiplexer PCA9548A
5. IC TL074
6. IC LM311
7. IC CD4069
8. IR2110 *Driver*
9. *Bootstrap Capacitor*
10. Osiloskop digital
11. IRFP 260N
12. Resistor
13. Kapasitor seramik
14. Kapasitor Elektrolitik

3.3. Aliran Penelitian dan Diagram Blok



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4. Diagram Blok Perancangan Alat



Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Alat

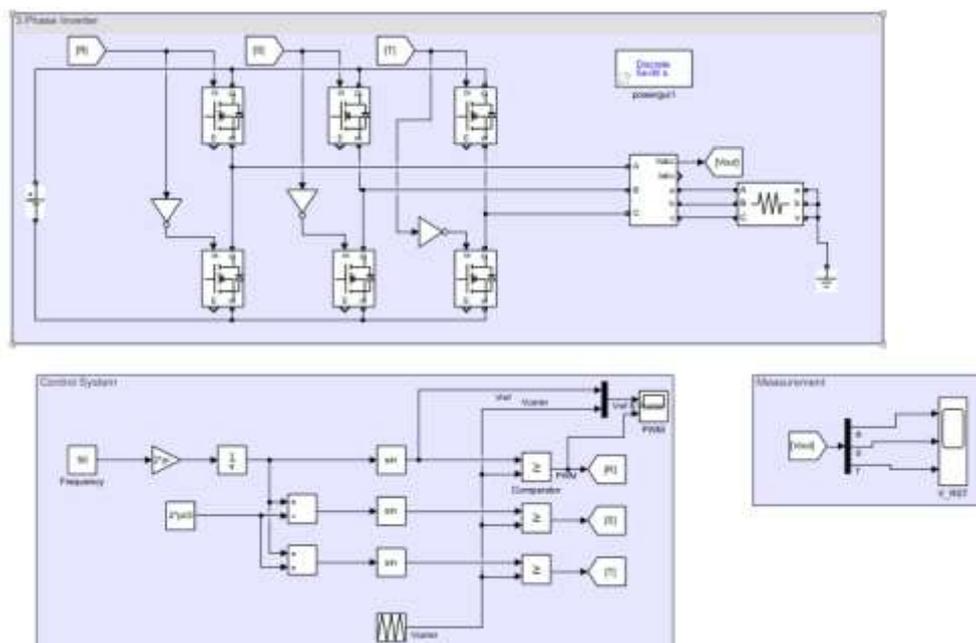
Gambar 3.1 adalah *flow chart* menunjukkan metodologi yang digunakan pada penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan Arduino dalam pembangkitan gelombang Sinus tiga fasa dan sinyal gelombang segitiga dibangkitkan menggunakan *Operational Amplifier*. Kemudian, dua sinyal tersebut dibandingkan menggunakan komparator untuk menghasilkan PWM. Setelah itu, PWM yang dihasilkan akan dikirimkan ke IR2110 *driver* dan *bootstrap capacitors* untuk dihantar ke rangkaian MOSFET yang akan mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC.

3.5. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Teknik Sinusoidal *Pulse Width Modulation* (SPWM) digunakan dalam mengkonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Dimana cara pembangkitan SPWM ini adalah dengan membandingkan sinyal referensi yaitu gelombang sinus dan sinyal karir sebagai sinyal pensaklaran atau *repetitive switching signal*. Sinyal karir ini memiliki frekuensi yang lebih tinggi berbanding sinyal referensi. SPWM yang dihasilkan diteruskan untuk pensaklaran pada mosfet yang digunakan pada inverter.

3.6. Simulasi Inverter SPWM

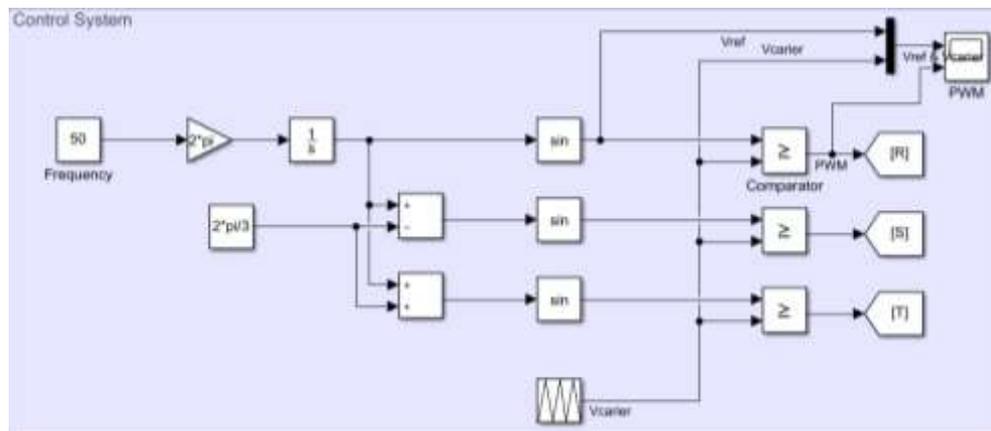
Simulasi ini menggunakan *software* matlab dan *simulink* untuk mensimulasikan inverter tiga fasa dengan menggunakan Teknik SPWM.



Gambar 3.3 Blok simulasi inverter spwm

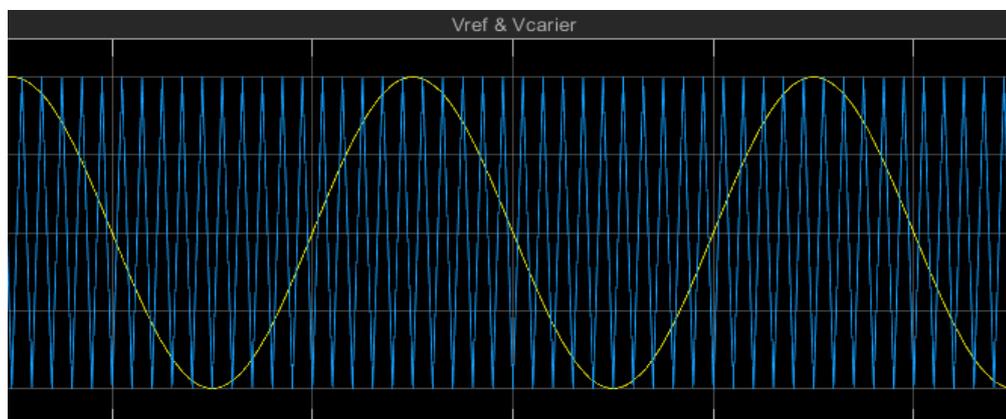
Gambar di atas merupakan blok simulasi inverter tiga fasa dengan menggunakan *simulink*. Dimana pada gambar diatas terdapat tiga blok dari simulasi ini, yaitu

sistem kontrol, sistem inverter dan pengukuran. Pada sistem kontrol yang digunakan dalam membangkitkan sinyal PWM.

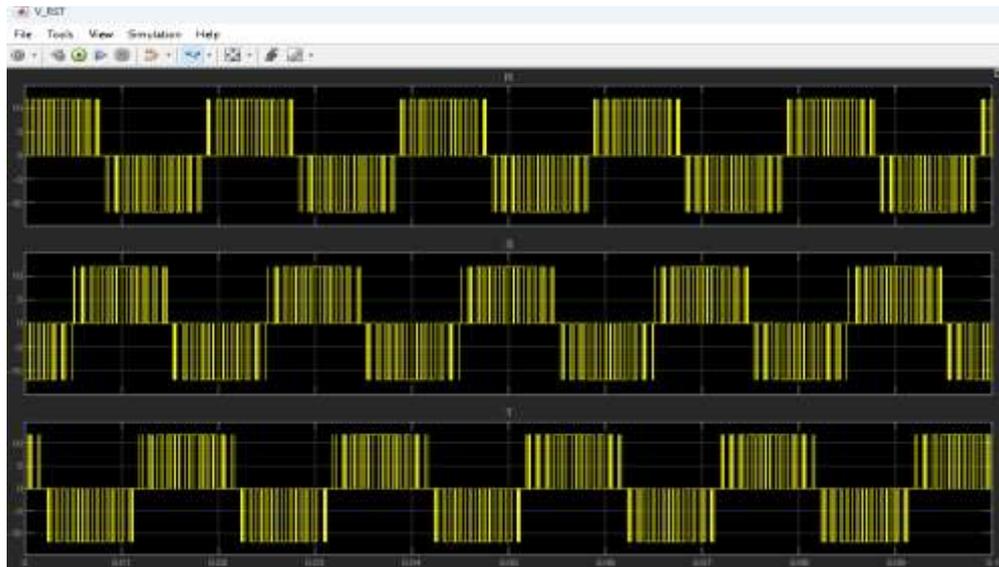


Gambar 3.4 Blok sistem control

Pada gambar diatas dapat diperhatikan tiga blok pembangkit gelombang sinus yang merupakan sinyal referensi dengan spesifikasi frekuensi 50Hz dan perbedaan fasa 120° . Selanjutnya, terdapat blok pembangkit sinyal segitiga yang merupakan sinyal karier dengan spesifikasi frekuensi 1K Hz, dimana sinyal referensi dan sinyal karier akan dibandingkan dengan komparator untuk menghasilkan sinyal PWM untuk pengsaklaran pada mosfet. Dimana gambar gelombang sinus, gelombang segitiga dan hasil simulasi inverter terlihat pada gambar 3.5 dan gambar 3.6.



Gambar 3.5 Perbandingan gelombang sinus dan segitga



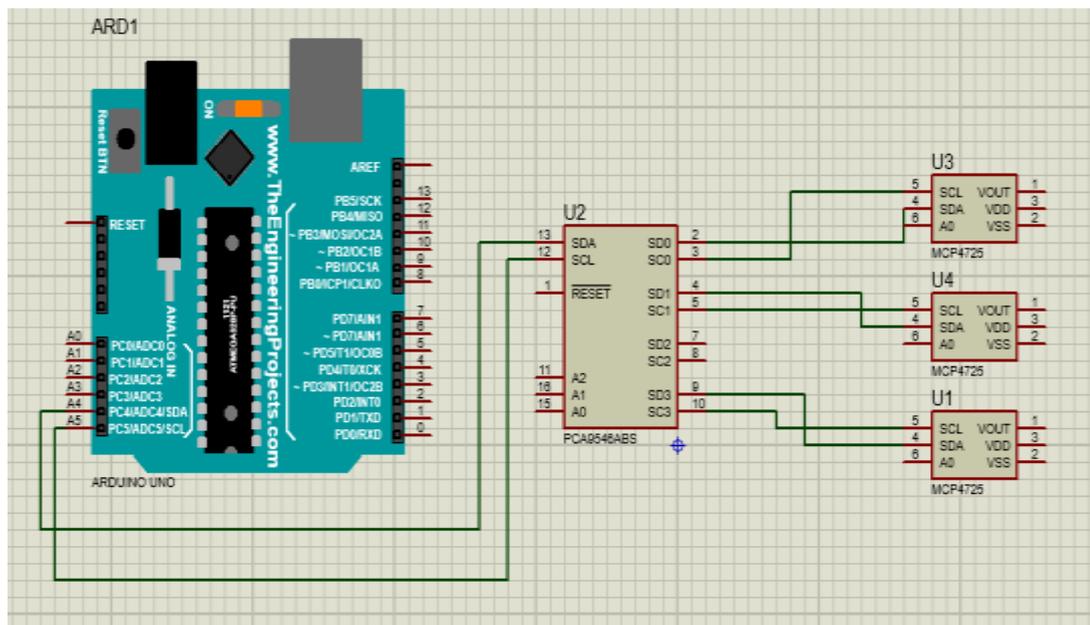
Gambar 3.6 Hasil simulasi keluaran inverter

3.7. Rangkaian Pembangkit Sinus Tiga Fasa

Arduino diperlukan sebagai mikrokontroler yang akan membangkitkan gelombang Sinus tiga fasa dengan menggunakan komponen tambahan yaitu *digital to analog converter* dan *Multiplexer*. Gambar 3.2 *software* Proteus 8 *Professional* yang digunakan dalam pembuatan skematik diagram dan Gambar 3.3 merupakan skematik diagram dalam pembangkitan gelombang Sinus tiga fasa.



Gambar 3.7 Proteus 8 *Professional*



Gambar 3.8 Skematik Diagram Pembangkit Gelombang Sinus Tiga Fasa

3.8. Rangkaian Pembangkit Gelombang Segitiga

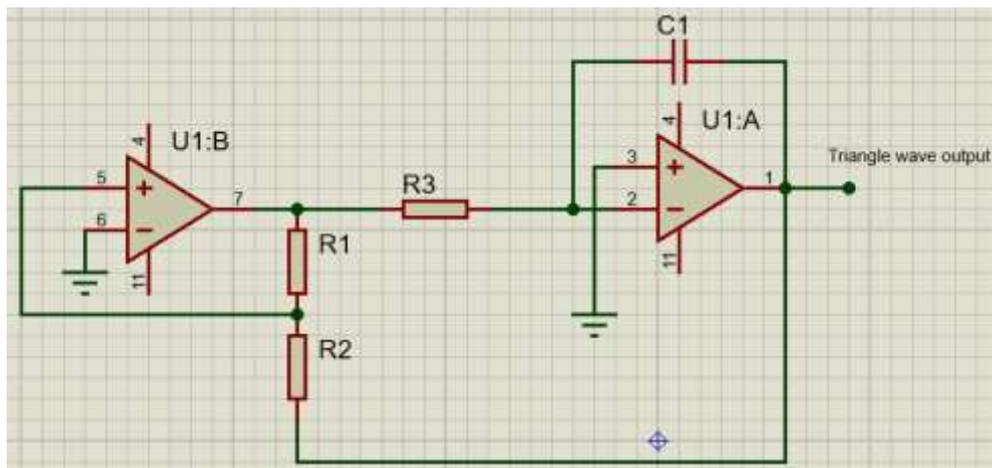
Pembangkit gelombang segitiga menggunakan dua op-amp, dimana op-amp pertama akan bekerja sebagai *Schmitt trigger* dan op-amp kedua sebagai intergrator. Rangkaian segitiga ini memiliki rumus yang akan digunakan untuk mengatur nilai tegangan V_{pp} dan frekuensi yang diinginkan.

Estimasi tegangan V_{pp} :

$$V_{pp} = 2 \times \frac{R_2}{R_1} \times V_{sat} \quad (3.1)$$

Estimasi frekuensi :

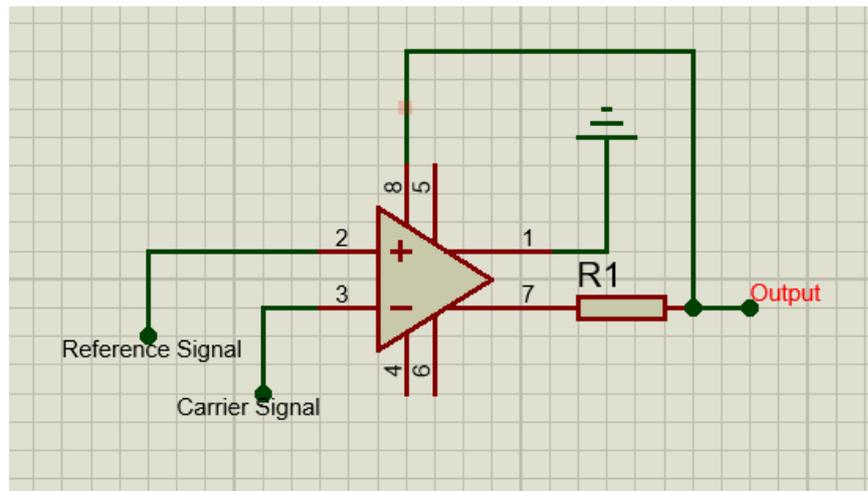
$$F = \frac{R_1}{4R_3R_2C_1} \quad (3.2)$$



Gambar 3.9 Skematik Diagram Pembangkit Gelombang Segitiga

3.9. Komparator

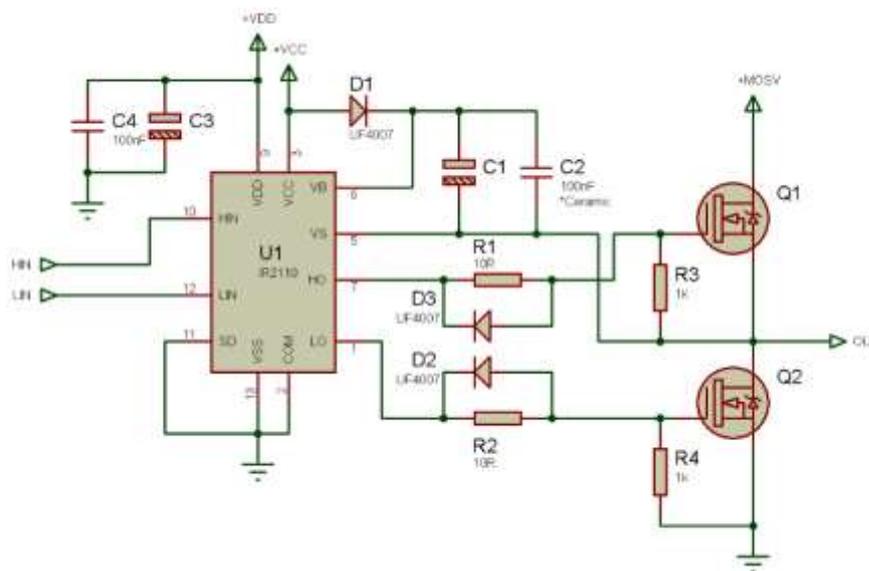
Komparator adalah komponen yang digunakan untuk membandingkan gelombang referensi dan gelombang karir. Dimana pada komparator ini memiliki kondisi apabila gelombang referensi lebih besar berbanding gelombang karir maka kondisi sama dengan 1 jika sebaliknya kondisi sama dengan 0. Gambar 3.6 merupakan skematik diagram komparator.



Gambar 3.10 Skematik Diagram Komparator

3.10. Gate Driver

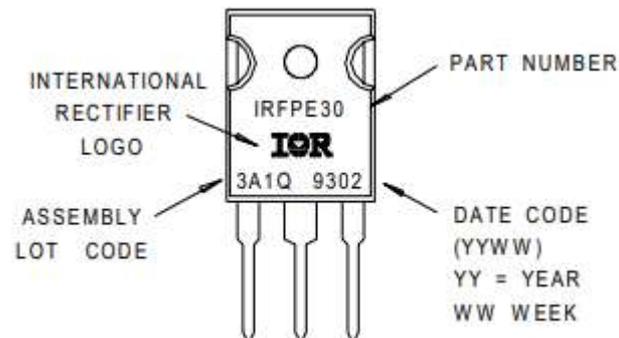
PWM *output* dari komparator akan dihubungkan ke IR2110 *gate driver* untuk meningkatkan tegangan dan *switching* kaki gate pada MOSFET. Skematik diagram dapat diperlihatkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.11 Tipikal koneksi pada IR2110 *Gate Driver*

3.11. *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)*

Enam *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* digunakan dalam penelitian. Dalam penelitian ini, MOSFET bekerja sebagai inverter untuk mengkonversi tegangan DC ke tegangan AC.



Gambar 3.12 Mosfet

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Pulse width modulation* (PWM) yang dibangkitkan dalam pensaklaran MOSFET adalah dengan membandingkan dua gelombang yaitu gelombang sinus dan gelombang segitiga.
2. Hasil *Total harmonic distortion* yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa semakin jauh dari fundamental frekuensi yaitu 50Hz maka mengakibatkan *total harmonic distortion* yang diperoleh turut semakin tinggi dikarenakan oleh rasio frekuensi pada fundamental dan karier.
3. Hasil percobaan motor tiga fasa bldc secara demonstrasi alat dan teori yang didapatkan bahwa semakin tinggi frekuensi maka semakin tinggi kecepatan motor.

5.2. Rekomendasi

Adapun rekomendasi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan penelitian ini sebagai berikut :

1. Menggunakan komponen dengan spesifikasi yang lebih baik untuk mendapatkan hasil *output* yang lebih baik.
2. Dikarenakan kelemahan dari elektronika daya maka untuk mengurai *ripple* pada *output* tegangan AC maka dapat menggunakan filter tambahan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. H. Suharti, H. M. Kristiana, and R. N. Amalia, "Design of flow control system based on PLC armfield pressure control module in chemical engineering laboratory," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1073, no. 1, p. 012053, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1073/1/012053.
- [2] P. N. Astya, M. Singh, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uttar Pradesh Section, and Sharda University. School of Engineering and Technology, *Design and Implementation of SPWM Inverter*.
- [3] International Network of Mechatronics Universities, Higher Technological Institute, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Speed Control of BLDC Motor By Using PID Control and Self-tuning Fuzzy PID Controller*.
- [4] Md. Mustafa Kamal and Lini Mathew, "Speed Control of Brushless DC Motor Using Intelligent Controllers."
- [5] T. L. Lee, Y. C. Wang, J. C. Li, and J. M. Guerrero, "Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 746–756, Feb. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2347008.
- [6] Agus Sugiyono, "PENANGGULANGAN PEMANASAN GLOBAL DI SEKTOR PENGGUNA ENERGI," 2006.
- [7] "Rumah_Tropis_Hemat_Energi-PRIANTO".
- [8] M. Djazim Syaifullah, "SUHU PERMUKAAN LAUT PERAIRAN INDONESIA DAN HUBUNGANNYA DENGAN PEMANASAN GLOBAL," 2015. [Online]. Available: <http://p3sdlp.litbang.kkp.go.id>
- [9] M. Azhar and D. Adam Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," 2018.
- [10] H. Asyari, R. Achmad Firmansyah, and M. Kusban, "ANALISA TINGKAT POTENSI SINAR MATAHARI UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI DAERAH PANTAI," pp. 82–89, 2020.
- [11] B. Hari Purwoto, E. Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif, M. F. Alimul, and I. Fahmi Huda, "EFISIENSI PENGGUNAAN PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF."

- [12] D. Dzulfikar and W. Broto, "OPTIMALISASI PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA," Universitas Negeri Jakarta, 2016, pp. SNF2016-ERE-73-SNF2016-ERE-76. doi: 10.21009/0305020614.
- [13] Z. Iqtimal, I. D. Sara, and D. Syahrizal, "APLIKASI SISTEM TENAGA SURYA SEBAGAI SUMBER TENAGA LISTRIK POMPA AIR," vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [14] F. Hidayat and K. Krismadinata, "Rancang Bangun VVVF Inverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi Tiga Fasa dengan Antarmuka Komputer," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, no. 2, pp. 47–56, Oct. 2019, doi: 10.24036/invotek.v19i2.609.
- [15] David Nugraha and Krismadinata, "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Dengan Dengan Modulasi Lebar Pulsa PWM Menggunakan Antarmuka Komputer," *JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL)*, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [16] N. Mohan, Undeland Tore, and Robbins William, "POWER ELECTRONICS," 1995.
- [17] Lalu Riza Aliyan, Rini Nur Hasanah, and M. Aziz Muslim, "Desain Inverter Tiga Fasa dengan Minimum," *Jurnal EECCIS*, vol. Vol. 8, No. 1, pp. 79–84, 2014.
- [18] F. Hidayat and K. Krismadinata, "Rancang Bangun VVVF Inverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi Tiga Fasa dengan Antarmuka Komputer," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, no. 2, pp. 47–56, Oct. 2019, doi: 10.24036/invotek.v19i2.609.
- [19] D. Untuk, M. Sebagian, P. Menjadi, and S. Teknik, "UNIVERSITAS INDONESIA PENGENDALIAN MOTOR BRUSHLESS DC DENGAN METODE PWM SINUSOIDAL MENGGUNAKAN ATMEGA16 SKRIPSI."