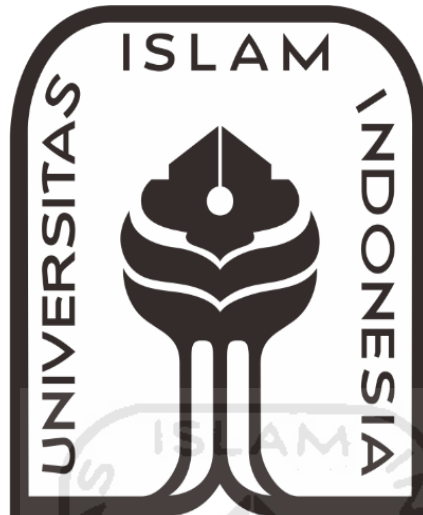


Transformatorless SPWM Inverter dengan Arduino
SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



الجامعة الإسلامية
الاندونيسية

Disusun oleh:
Mustofa Hasan Darojat
16524121

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta
2020

LEMBAR PENGESAHAN

Transformtorless SPWM Inverter dengan Arduino

TUGAS AKHIR

**Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**

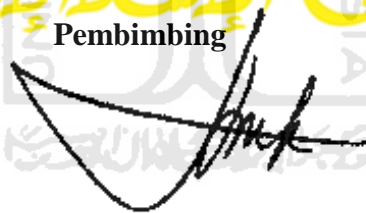
Disusun oleh:

**Mustofa Hasan Darajat
16524121**

Yogyakarta, 12-September-2020

Menyetujui,

Pembimbing



**Dr. Eng. Hendra Setiawan, S.T., M.T
025200526**

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

Transformtorless SPWM Inverter dengan Arduino

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Mustofa Hasan Darajat

16524121

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: **05 Oktober 2020**

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : **Dr. Eng. Hendra Setiawan, S.T., M.T.**

Anggota Penguji 1: **Medila Kusriyanto, S.T., M.Eng.**

Anggota Penguji 2: **Dwi Ana Ratna Wati, S.T., M.Eng.**

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: **06 November 2020**

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Sc., Ph.D

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 12 September 2020



Mustofa Hasan Darajat

KATA PENGANTAR



Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Puji syukur *Alhamdulillah* penulis panjatkan kehadiran Allah *Subhanallahu Wa Ta'ala*, yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya kepada kita semua, sehingga penulis dapat menjalankan semua kewajiban kuliah untuk menempuh gelar sarjana S1 dengan lancar. Shalawat beriringan salam, tidak lupa kita haturkan kepada junjungan kita *Rasulullah Shalallahu'alaihi Wassalam*, yang telah mengabdikan hidupnya menyampaikan jalan kebenaran menuju surga bagi orang-orang yang mengikutinya.

Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu komponen penilaian dan syarat yang wajib ditunaikan dalam rangka menyelesaikan studi strata satu S1 dengan bidang studi ilmu teknik elektro. Penulis menyadari bahwa dalam penelitian, perancangan dan penulisan laporan ini masih terdapat beberapa kekurangan. Namun demikian, dengan adanya beberapa bantuan dari berbagai pihak semua kendala dapat diselesaikan dengan baik.

Banyak dukungan dan bantuan yang peneliti terima sehingga kegiatan Penelitian Tugas Akhir dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dapat terwujud. Untuk itu perkenankanlah peneliti mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang selalu memberikan hidayah, kenikmatan yang begitu besar serta kemudahan selama proses tugas akhir ini berlangsung, sehingga peneliti bisa menyelesaikan studi ini.
2. Rasulullah Salallahu'alaihi Wassalam yang telah mengenalkan Islam secara kaffah, mengajarkan hikmah kehidupan dan mengenalkan tentang esensi dari kehidupan.
3. Kedua orang tua dan keluarga besar tercinta dimanapun berada, terima kasih untuk kasih sayang, motivasi, nasihat, dukungan, dan jasa sekecil apapun itu, semoga Allah Ta'ala membalasnya.
4. Bapak Dr. Eng. Hendra Setiawan, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing, untuk didikan dan pelajaran yang diberikan.
5. Bapak Husein Mubarak, ST., M.Eng. selaku kepala Lab Ketenagaan, atas izin yang telah diberikan dalam pengambilan data dan peminjaman alat Lab.
5. Keluarga Teknik Elektro UII Angkatan 2016, untuk kebersamaan dan pengalaman berharga yang tak ternilai.
6. Tim Mobil Listrik UII, atas segala pengalaman pertukangan yang telah diberikan.
7. Segala pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Jazakumullahu Khairan Katsiran. Semoga Allah Subhanahu Wata'ala membalas segala kebaikan seluruh pihak. Peneliti menyadari bahwa dalam laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh sebab itu, peneliti mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dan memotivasi dalam pengembangan dimasa yang akan datang. Wassalamu'alaikum warahmatulahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 25 Agustus 2020

Penulis



ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Singkatan	Arti Singkatan
<i>CG</i>	<i>Centralized Generation</i>
<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>PLN</i>	Perusahaan Listrik Negara
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i>
<i>PF</i>	<i>Power Factor</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>IC</i>	<i>Integrated Circuit</i>
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>SPWM</i>	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
<i>THD</i>	<i>Total Harmonic Distortion</i>
<i>dBc</i>	<i>Decibel Relative to Carrier</i>
<i>dBv</i>	<i>Decibel Relative to Voltage</i>
<i>dBm</i>	<i>Decibel Absolute to Power Ratio</i>
<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>SCR</i>	<i>Silicone Controlled Rectifier</i>
<i>MOSFET</i>	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>

ABSTRAK

Inverter merupakan sebuah perangkat elektronik yang dapat mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Dalam perangkat *inverter* terdapat tiga bagian utama yaitu bagian PWM, *transformator*, dan komponen power elektronis untuk melakukan tugas pensaklaran sesuai perintah PWM. Kualitas *inverter* secara umum ditentukan oleh gelombang keluarannya, semakin gelombang keluarannya mendekati gelombang sinusoidal murni maka akan semakin baik kualitas suatu *inverter* tersebut. Untuk itu diperlukan sebuah solusi untuk dapat membangkitkan gelombang sinus yaitu dengan metode SPWM menggunakan perangkat Arduino. Pada penelitian ini tegangan DC sebesar 12 volt diberikan pada rangkaian konverter untuk dinaikkan tegangannya menjadi 310 volt DC, tegangan DC sebesar 310 volt tersebut kemudian diubah menjadi tegangan AC 220 volt pada rangkaian inverter. Rangkaian inverter pada penelitian ini menggunakan teknik modulasi SPWM menggunakan perangkat Arduino. Sinyal SPWM mengatur *duty cycle* digunakan untuk memberikan perintah pensaklaran pada komponen power elektronis berupa MOSFET, hasil dari proses pensaklaran MOSFET kemudian difilter menggunakan LC filter untuk mendapatkan bentuk gelombang keluaran yang mendekati bentuk sinusoidal. Penelitian ini diharapkan dapat membangun inverter yang mudah untuk dibuat, ringan, dan memiliki performa tinggi.

Kata Kunci: *Inverter, PWM, Arduino, Konverter.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Studi Literatur	3
2.2 Tinjauan Teori.....	4
2.2.1 <i>Inverter</i>	4
2.2.2 <i>Pulse Width Modulation</i>	7
2.2.3 <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>	8
2.2.4 <i>Total Harmonic Distortion</i>	9
2.2.5 <i>SPWM Inverter</i> Berbasis Mikrokontroler.....	10
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	12
3.1 Alur Perancangan.....	12
3.2 Alat dan Bahan.....	13
3.3 Spesifikasi Alat.....	15

3.4 Blok Diagram Sistem <i>Inverter</i>	15
3.5 Rangkaian Sistem <i>Inverter</i>	17
3.6 Algoritma Program Arduino	21
3.7 Pengujian Karakterisasi <i>Inverter</i>	22
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1 Pengujian Daya <i>Inverter</i>	24
4.1.1 Pengujian <i>Inverter</i> Tanpa Beban.....	24
4.1.2 Pengujian <i>Inverter</i> dengan Beban R	25
4.1.3 Pengujian <i>Inverter</i> dengan Beban RL.....	26
4.1.4 Pengujian <i>Inverter</i> dengan Beban RLC	27
4.2 Pengujian Gelombang Keluaran <i>Inverter</i>	28
Pengujian Gelombang Keluaran <i>Inverter</i> Beban RLC	28
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	30
5.1 Kesimpulan	30
5.2 Saran	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Topologi <i>fly-back</i> [13].....	5
Gambar 2.2 Topologi <i>Half-bridge</i> [13].....	5
Gambar 2.3 Topologi <i>Full-bridge</i> [13]	6
Gambar 2.4 Rangkaian <i>Resonator</i> PWM [7]	7
Gambar 2.5 Gelombang Keluaran PWM Berdasarkan Rangkaian <i>Resonator</i> [7].....	7
Gambar 2.6 Teknik Pembangkitan Gelombang <i>SPWM</i> [8]	8
Gambar 2.7 Sinyal <i>SPWM</i> Keluaran dari op-amp [8].....	9
Gambar 2.8 <i>SPWM Inverter</i> Rancangan Ismail dkk [3].....	11
Gambar 3.1 Langkah Kegiatan Penelitian.....	12
Gambar 3.2 Multimeter	13
Gambar 3.3 Osiloskop.....	14
Gambar 3.4 Beban RLC	14
Gambar 3.5 Diagram blok <i>converter</i>	15
Gambar 3.6 Diagram blok <i>inverter</i>	16
Gambar 3.7 Skema Rangkaian DC-DC Konverter	17
Gambar 3.8 Skema Rangkaian <i>Inverter</i>	20
Gambar 3.9 Algoritma Program Arduino.....	20
Gambar 3.10 Skema Pengujian <i>Inverter</i>	22
Gambar 4.1 Gelombang keluaran <i>inverter</i> dan parameter FFT	28

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Alat	15
Tabel 3.2 Daftar Komponen Rangkaian DC-DC Konverter	18
Tabel 3.3 Daftar Komponen Rangkaian <i>Inverter</i>	20
Tabel 4.1 Parameter Pengujian <i>Inverter</i> Tanpa Beban	24
Tabel 4.2 Parameter pengujian <i>inverter</i> dengan beban R	25
Tabel 4.3 Parameter pengujian <i>inverter</i> dengan beban RL	26
Tabel 4.4 Parameter pengujian <i>inverter</i> dengan beban R L C	27
Tabel 4.5 Parameter FFT	29



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Negara Indonesia yang terdiri dari berbagai pulau menjadikan rasio penyebaran pembangkit tenaga listrik dan pusat-pusat beban listrik tidak merata. Menurut data statistik ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2016 rasio elektrifikasi Pulau Jawa – Bali 94,52%, Pulau Sumatera 89,50%, Pulau Kalimantan 84,86%, Pulau Nusa Tenggara 68,07%, Pulau Sulawesi 87,48%, dan Pulau Papua 68,01%. Pembangkit tenaga listrik yang belum tersebar merata merupakan faktor penyebab utama dalam kasus tidak meratanya rasio elektrifikasi baik di Indonesia maupun di negara-negara yang masih menganut sistem pembangkitan terpusat (*Centralized Generation / CG*) [1].

Untuk mengatasi pembangkit listrik yang terpusat dan tersebar tidak merata maka dibutuhkan suatu sistem pembangkitan yang lebih banyak dan tersebar pada pusat-pusat beban [1]. Tersedianya sumber energi yang melimpah di Indonesia sebenarnya dapat menjadikan solusi untuk permasalahan tersebut. Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk memperbanyak pusat pembangkitan adalah dengan membuat sistem kelistrikan *microgrid* [2]. *Microgrid* merupakan sistem kelistrikan yang dapat memanfaatkan sumber-sumber energi dengan skala kecil seperti memanfaatkan aliran sungai kecil atau sinar matahari untuk menyediakan listrik satu desa atau perumahan misalnya.

Pada suatu sistem *microgrid* dapat dipastikan terdapat alat yang dapat mengubah listrik DC (*direct current*) menjadi listrik AC (*alternating current*), alat tersebut dinamakan *inverter*. *Inverter* merupakan suatu alat yang dapat merubah arus DC menjadi arus AC dengan cara memutus-hubungkan arus DC pada periode tertentu menggunakan sinyal PWM (*pulse width modulation*) yang dihasilkan oleh rangkaian pembangkit gelombang. Arus DC yang telah diputus dan hubungkan pada periode tertentu kemudian diteruskan menuju rangkaian penguat sinyal, setelah sinyal PWM dikuatkan selanjutnya diteruskan ke transformator untuk mendapatkan level tegangan yang diinginkan. Salah satu jenis PWM adalah SPWM (*sine pulse width modulation*) dimana gelombang yang dihasilkan dari metode ini adalah gelombang yang mendekati bentuk sinus.

Pada penelitian ini, peneliti mengajukan metode PWM pada *inverter* tanpa transformator dengan teknik SPWM menggunakan Arduino sebagai rangkaian pembangkit gelombang. Penelitian ini diharapkan mampu merancang sebuah *inverter* yang sederhana dan menghasilkan gelombang yang mendekati bentuk sinus.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang adalah,

1. Bagaimana membuat sebuah *inverter* tanpa transformator yang mampu menghasilkan gelombang keluaran yang mendekati gelombang sinus.
2. Bagaimana membuat sebuah SPWM dengan menggunakan Arduino.
3. Bagaimana performa dari *inverter* SPWM tanpa menggunakan transformator.

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini tidak membahas manipulasi program pada Arduino seperti pengukuran tegangan, daya, atau pengukuran lainnya.
2. Penelitian ini tidak membahas perhitungan dan perancangan *filter*.
3. Penelitian ini tidak membahas tentang perbandingan performa antara *inverter* dengan menggunakan transformator dan *inverter* tanpa transformator.
4. Penelitian ini tidak membahas perbandingan performa *inverter* teknik modulasi SPWM dengan *inverter* dengan teknik modulasi lainnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah,

1. Membuat sebuah *inverter* tanpa transformator yang mampu menghasilkan gelombang keluaran yang mendekati gelombang sinus.
2. Membuat sebuah SPWM dengan menggunakan Arduino.
3. Mengetahui performa dari *inverter* tanpa menggunakan transformator.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah,

1. Dapat memperluas penggunaan sistem *microgrid* di daerah yang tertinggal dan terpencil dengan dibuatnya sebuah *inverter* yang mampu menghasilkan gelombang keluaran mendekati gelombang sinus.
2. Menumbuhkan rasio elektrifikasi nasional dengan meluasnya penggunaan *microgrid* karena proses perancangan dan pembuatan *inverter* yang mudah khususnya bagi daerah yang belum teraliri listrik PLN.
3. Dapat menjadi bahan penelitian dikemudian hari bagi Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia khususnya dan bagi sivitas akademika pada umumnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Pengembangan SPWM *Inverter* telah banyak dilakukan sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Ismail dkk [3]. Mereka merancang desain sebuah *inverter* dengan metode SPWM, berbasis *microcontroller*. Teknik SPWM digunakan oleh peneliti untuk menghasilkan gelombang tegangan dan arus keluaran mendekati gelombang sinus murni. Mereka mendapatkan hasil dari rancangan SPWM *inverter* berbasis *microcontroller* yang diujicobakan dengan beban resistif ternyata mendapatkan hasil yang sangat baik yaitu dengan THD (*total harmonic distortion*) kurang dari 4% untuk tegangan dan 8% untuk arus, hasil ini memenuhi standar IEEE (519-1992). Rancangan *inverter* SPWM berbasis *microcontroller* yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan hasil yang sangat baik, namun rancangan *inverter* mereka masih menggunakan transformator berintikan besi yang memiliki bentuk fisik yang besar dan berat serta memiliki nilai kepadatan daya yang rendah [4].

Transformator berintikan besi memiliki bentuk yang besar, berat dan memiliki kepadatan daya yang rendah, hal ini menjadikan sistem *inverter* yang dibuat menjadi besar dan susah diaplikasikan[5]. Untuk mendapatkan induktansi (*energy transfer*) dengan tingkat efisiensi dan kepadatan daya yang tinggi, maka induktansi memerlukan tingkat frekuensi yang tinggi. Sementara itu transformator berinti besi tidak dapat berjalan pada frekuensi tinggi. Oleh karena itu L. Wuhua dkk, membangun sebuah *inverter* SPWM tanpa menggunakan transformator seperti yang dibangun oleh Ismail dkk. Mereka membangun sebuah konverter untuk mengubah tegangan DC rendah ke level tegangan DC yang lebih tinggi menggunakan transformator berinti ferit, dimana bahan ini bekerja maksimal pada frekuensi tinggi. Tegangan DC yang memiliki level tegangan yang lebih tinggi kemudian dimodulasikan dengan metode SPWM menggunakan power elektronik seperti: transistor, MOSFET, IGBT (*insulated gate bipolar transistor*) atau SCR (*silicone controlled rectifier*) untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik (AC) sesuai yang diharapkan. Kelebihan dari metode ini adalah dapat dikembangkan sebuah *inverter* yang memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi mencapai 96,5 % pada beban 1 kW dan memiliki kepadatan daya yang lebih besar terbukti dengan hanya menggunakan 4 buah IGBT seri IRGB4056D mampu menyediakan daya mencapai 1 kW[5].

Metode modulasi pada sebuah *inverter* yang paling disukai pada saat ini adalah metode SPWM. Metode yang paling umum digunakan pada tipe PWM ini adalah membandingkan bentuk gelombang sinusoidal dengan bentuk gelombang pembawa. Teknik ini dapat dilakukan

dengan membuat gelombang segitiga sebagai gelombang pembawa menggunakan rangkaian pembangkit gelombang dan beberapa komparator untuk mendapatkan bentuk gelombang sinus. Namun kedua tahapan tersebut membutuhkan rangkaian yang memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi. *Microcontroller* dapat melakukan kedua langkah tersebut secara bersamaan sehingga rangkaian SPWM tersebut akan lebih sederhana karena dapat menghilangkan rangkaian pembangkit gelombang dan komparator untuk mendapatkan gelombang sinus [6].

Peneliti [3], [5], dan [6] telah memberikan dasar yang kuat mengenai perancangan SPWM *inverter*. Peneliti akan mencoba merancang sebuah *transformatorless* SPWM *inverter* berbasis *microcontroller* Arduino, dengan harapan dapat membuat sebuah *inverter* yang memiliki tegangan dan arus keluaran mendekati gelombang sinus murni dan memiliki tingkat kepadatan daya yang tinggi, sehingga nantinya dapat dipergunakan untuk mengkonversi sumber energi terbarukan seperti energi matahari secara mudah dan murah serta memiliki tingkat efisiensi yang tinggi serta dapat digunakan di daerah yang belum teraliri listrik oleh PLN.

2.2 Tinjauan Teori

Berbicara mengenai *inverter*, pasti didalamnya memuat tentang teknik dalam memodulasi. Peralnya *inverter* adalah sebuah piranti yang mengubah suatu bentuk gelombang menjadi bentuk gelombang yang lainnya. Selain dalam teknik modulasi di dalam *inverter* juga terdapat piranti yang dapat menaikkan satu level tegangan ke level tegangan yang diinginkan. Dalam membangun sebuah *inverter* tentunya juga menggunakan sebuah *gate driver* untuk membantu memutus dan menghubungkan tegangan sesuai dengan perintah PWM.

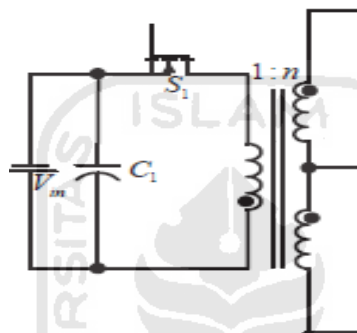
2.2.1 *Inverter*

Inverter merupakan suatu alat yang dapat mengubah bentuk tegangan DC menjadi bentuk tegangan AC pada level tegangan dan frekuensi tertentu. *Inverter* mengubah gelombang DC menjadi AC dengan cara memutus dan menghubungkan arus pada waktu tertentu berdasarkan perintah dari rangkaian PWM. Setidaknya terdapat 3 jenis gelombang keluaran dari sebuah *inverter*. Pertama *inverter* dengan gelombang keluaran kotak, *inverter* ini tidak banyak digunakan karena gelombang yang dihasilkannya dapat merusak peralatan yang disuplai olehnya. Kedua, *inverter* dengan gelombang keluaran *quasi* sinus, *inverter* ini menghasilkan gelombang keluaran yang lebih baik dan lebih mendekati ke bentuk gelombang sinus. *Inverter* ini banyak digunakan di pasaran dan biasanya digunakan untuk beban-beban penerangan, akan tetapi *inverter* ini akan membuat beban-beban induktif kehilangan tingkat efisiensinya dan menjadikan beban tersebut cepat panas. Ketiga adalah *inverter* dengan gelombang keluaran

sinus, *inverter* ini mampu menghasilkan gelombang keluaran yang hampir mirip dengan gelombang sinus yang dihasilkan oleh putaran generator. *Inverter* jenis ini banyak digunakan di dunia industri sebagai pengontrol kecepatan motor. *Inverter* ini jenis ini memiliki gelombang keluaran yang hampir sinus sehingga beban-beban induktif yang banyak terdapat di dunia industri akan berjalan sebagaimana mestinya. Di dalam sebuah *inverter* juga terdapat komponen power elektronik sebagai pemutus dan penghubung gelombang dengan perintah PWM. Komponen power elektronik yang digunakan untuk meneruskan perintah PWM tersebut dapat berupa: transistor, SCR, MOSFET, dan IGBT yang dikonfigurasi dalam topologi tertentu.

Terdapat 3 macam topologi yang digunakan dalam mengkonfigurasi komponen power elektronik tersebut, antara lain:

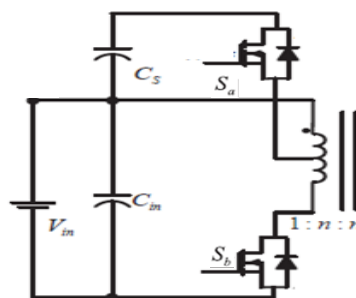
1. Topologi *Fly-back*



Gambar 2.1 Topologi *fly-back* [13]

Topologi *fly-back* seperti yang terdapat pada gambar 2.1 di atas, memasang power elektronik untuk merespon satu perintah sinyal dari PWM dalam sekali periodenya. C_1 merupakan kapasitor filter yang berfungsi untuk memfilter riak tegangan sumber V_{in} . S_1 merupakan sebuah komponen pensaklar elektronik berupa MOSFET yang akan memutus atau menghubungkan tegangan V_{in} sesuai perintah PWM. Tegangan pulsa dari MOSFET kemudian diteruskan ke komponen *transformator* dengan perbandingan belitan 1: n.

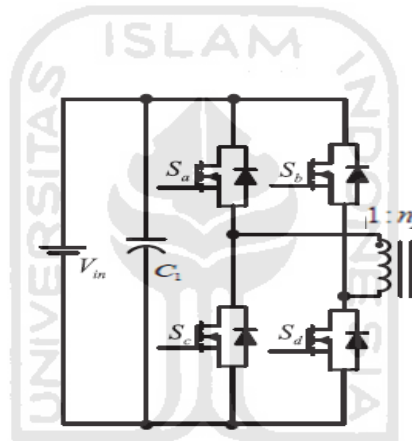
2. Topologi *Half-bridge*



Gambar 2.2 Topologi *Half-bridge* [13]

Topologi *half-bridge* seperti yang terdapat pada gambar 2.2 di atas, memasang saklar elektronis untuk merespon dua perintah sinyal dari PWM dalam sekali periodenya. C_1 merupakan kapasitor filter yang berfungsi untuk memfilter riak tegangan sumber V_{in} . C_s merupakan kapasitor *snubber* yang berfungsi untuk menekan lonjakan tegangan ketika terjadi pengosongan muatan pada transformator. S_a merupakan komponen pensaklar elektronis berupa MOSFET yang akan merespon setengah siklus pertama gelombang keluaran PWM dan S_b merupakan komponen pensaklar elektronis berupa MOSFET yang akan merespon setengah siklus berikutnya dari keluaran PWM. Tegangan pulsa dari kedua MOSFET ini kemudian diteruskan ke komponen *transformator* dengan perbandingan belitan 1:n:n.

3. Topologi *Full-bridge*

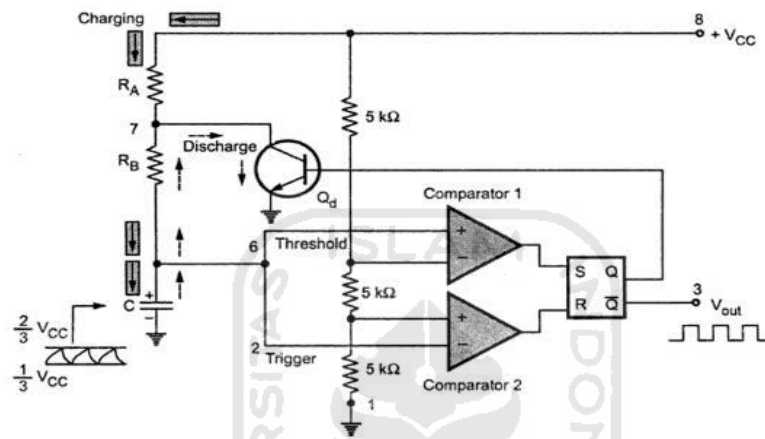


Gambar 2.3 Topologi *Full-bridge* [13]

Topologi *full-bridge* seperti yang terdapat pada gambar 2.3 di atas, memasang saklar elektronis untuk merespon dua perintah sinyal dari PWM dalam sekali periodenya. C_1 merupakan kapasitor filter yang berfungsi untuk memfilter riak tegangan sumber V_{in} . S_a sampai dengan S_d merupakan komponen pensaklar elektronis berupa MOSFET yang akan merespon sinyal keluaran PWM. S_a dan S_d akan merespon setengah siklus pertama gelombang keluaran PWM, sementara S_b dan S_c akan merespon setengah siklus berikutnya dari keluaran PWM. Topologi jenis ini paling banyak digunakan dalam *inverter* karena mampu menghasilkan pensaklaran yang lebih halus dan tidak membebani PWM. Topologi *full-bridge* digunakan untuk mendapatkan hasil pensaklaran yang lebih halus dibandingkan dengan topologi *half-bridge* dan mampu mengalirkan arus empat kali lipat lebih besar daripada topologi fly-back.

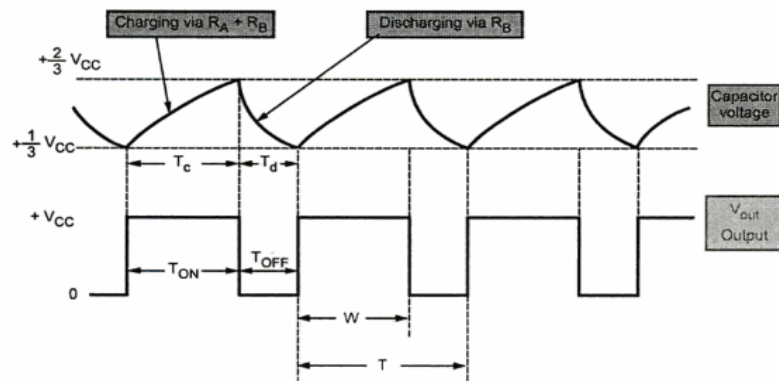
2.2.2 Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation merupakan sebuah rangkaian pembangkit sinyal dengan periode tertentu yang biasanya digunakan untuk memberi perintah *on-off* pada peralatan pemutus dan penghubung perangkat pensaklar power elektronik seperti: Transistor, MOSFET, IGBT atau SCR. Gelombang keluaran dari PWM dapat dibangkitkan melalui rangkaian *resonator* yang terdiri dari konfigurasi beberapa kapasitor dan resistor yang kemudian dikomparasikan menggunakan perangkat komparator. Rangkaian PWM dapat dilihat pada gambar 2.4, di bawah ini.



Gambar 2.4 Rangkaian *Resonator* PWM [7]

Gelombang keluaran dari PWM terjadi karena adanya pengosongan dan pengisian tegangan kapasitor C pada rangkaian resonator sehingga menimbulkan gelombang gergaji, kemudian rangkaian komparator membandingkan amplitudo gelombang gergaji sehingga menghasilkan gelombang keluaran *on-off* yang sesuai dengan waktu pengosongan dan pemuatan tegangan kapasitor C. Gelombang keluaran dari PWM dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Gelombang Keluaran PWM Berdasarkan Rangkaian *Resonator* [7]

Keterangan:

$W = T_{ON} =$ waktu on

$T =$ gelombang satu siklus

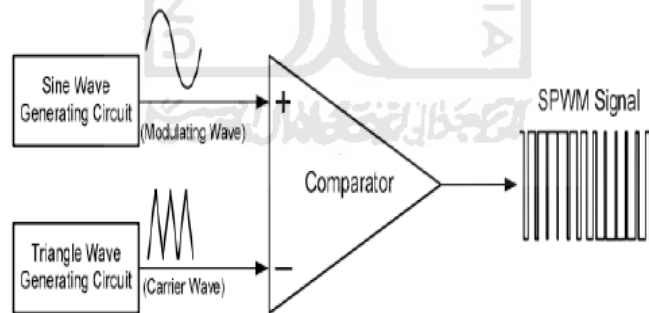
$$D = \text{duty cycle} = \frac{W}{T}$$

$T_c = T_{ON} =$ charging time

$T_d = T_{OFF} =$ discharging time

2.2.3 Sinusoidal Pulse Width Modulation

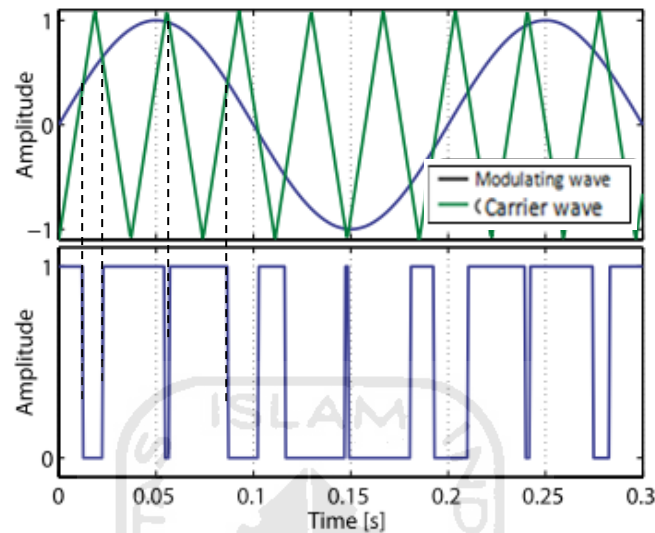
Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) merupakan suatu metode membangkitkan gelombang sinusoidal dengan cara merubah *duty cycle* salam setiap satu periode gelombang. SPWM akan membangkitkan pulsa dengan *duty cycle* yang kecil pada awal periode gelombang yang kemudian bertahap mulai membesar nilai *duty cycle*-nya pada pertengahan periode gelombangnya, kemudian *duty cycle* akan kembali mengecil pada akhir periode gelombangnya. Gelombang tersebut kemudian di *filter* menggunakan *low pass LC filter* sehingga mendapatkan gelombang keluaran yang mendekati gelombang sinusoidal murni. Sinyal SPWM banyak digunakan pada sistem kendali motor induksi dan *inverter* karena sinyal keluaran yang dihasilkan memiliki THD yang kecil [3]. Teknik membangkitkan gelombang SPWM secara analog menggunakan komparator dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Teknik Pembangkitan Gelombang SPWM [8]

Teknik pembangkitan sinyal SPWM dengan menggunakan sistem analog seperti pada gambar 2.6 dilakukan dengan cara membandingkan gelombang referensi (*modulating*) berupa gelombang sinusoidal dengan gelombang pembawa (*carrier*) yaitu gelombang segitiga (*triangle wave*), perbandingan kedua gelombang tersebut menghasilkan keluaran berupa sinyal SPWM dengan nilai *duty cycle* yang semakin membesar pada pertengahan periode sinyal dan kemudian mengecil kembali pada akhir periode sinyalnya. Sinyal SPWM ini kemudian digunakan untuk memberikan perintah *on-off* pada power ekelektronik seperti MOSFET.

Gelombang sinusoidal diberikan pada masukan *non-inverting op-amp* dan gelombang segitiga diberikan pada masukan *inverting op-amp*, kedua perlakuan pada *op-amp* ini akan mengakibatkan komparasi antara gelombang sinusoidal sebagai sinyal referensi dengan gelombang segitiga sebagai gelombang pembawa sehingga pada keluaran *op-amp* akan menghasilkan sinyal SPWM. Sinyal SPWM hasil keluaran dari *op-amp* dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Sinyal SPWM keluaran dari *op-amp* [8]

Gambar 2.7 merupakan sinyal SPWM keluaran dari *op-amp* yang berfungsi sebagai komparator. Ketika nilai amplitudo gelombang referensi (*modulating wave*) lebih besar dari nilai amplitudo gelombang pembawa (*carrier wave*), maka sinyal SPWM akan memiliki nilai amplitudo 1 (*high*). Begitu pula sebaliknya ketika nilai amplitudo gelombang referensi (*modulating wave*) lebih kecil dari nilai amplitudo gelombang pembawa (*carrier wave*) maka sinyal SPWM akan memiliki nilai amplitudo 0 (*low*).

2.2.4 Total Harmonic Distortion

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan perbandingan nilai tegangan *rms* (*root mean square*) antara sinyal fundamental dengan sinyal harmonis yang muncul setelah sinyal fundamentalnya. THD pada umumnya muncul dan bernilai besar hingga harmonik orde 5 dari suatu sinyal tersebut [9].

Dalam dunia ketenagalistrikan THD merupakan salah satu penentu kualitas daya listrik (*power quality*) jika ditinjau dari bentuk gelombangnya. THD dirumuskan sebagai nilai *rms* dari sinyal harmonik selain sinyal fundamentalnya, dibagi dengan nilai *rms* sinyal fundamentalnya. Berikut persamaan untuk memperoleh THD dari suatu sinyal periodik.

$$THD (\%) = 100 \times \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_s} \quad (2.1)$$

Dimana,

THD = Total Harmonic Distortion

V_n = Tegangan RMS harmonik ke-n

V_s = Tegangan RMS frekuensi fundamental

THD dapat diukur menggunakan sebuah *spectrum analyzer* atau menggunakan osiloskop, pengukuran THD pada alat tersebut menggunakan fungsi FFT (*fast fourier transform*). Fungsi FFT digunakan untuk mengamplifikasi keluaran dari sinyal harmonik yang diuji. Pengukuran sinyal harmonik menggunakan fungsi FFT biasanya terukur dalam satuan dBc atau dBv, dan dBm. Besaran dBc atau dBv merupakan nilai daya relatif sinyal harmonik ke-n terhadap frekuensi fundamentalnya. Sementara dBm merupakan nilai *absolute power ratio* dari suatu sinyal harmonik. Perhitungan THD apabila diketahui nilai dBm dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut [10].

$$THD(\%) = 100 \times \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2} \quad (2.2)$$

Dimana,

THD = Total Harmonic Distortion

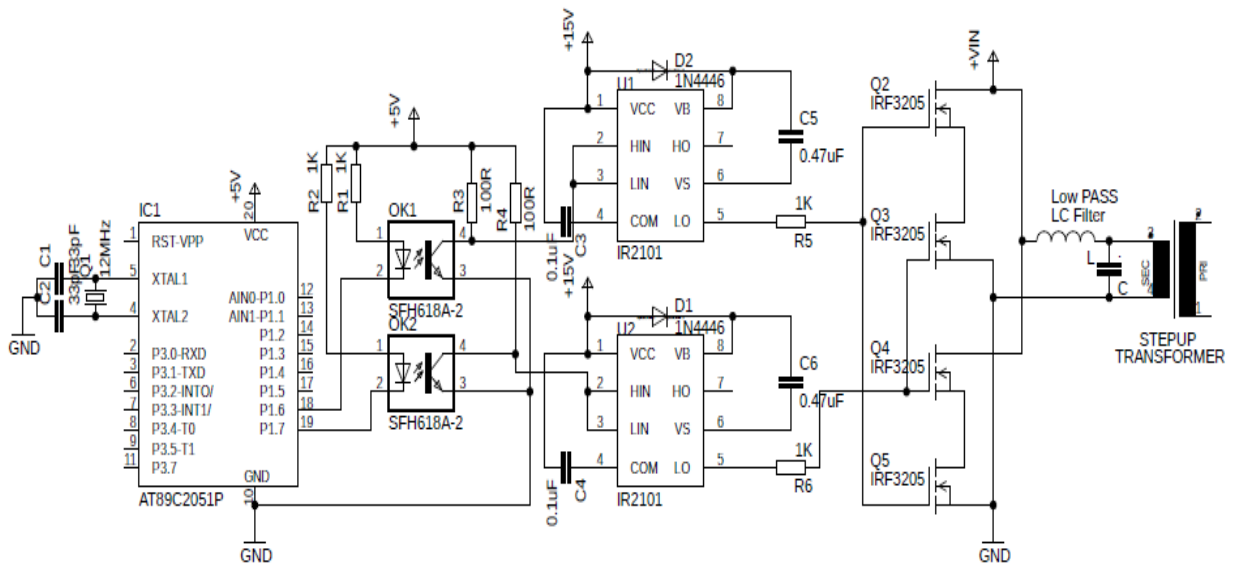
p_n = absolute power ratio = dBm

Catatan, nilai dBm² sebanding dengan $10^{\left(\frac{dBc}{10}\right)}$ [10].

2.2.5 SPWM Inverter Berbasis Mikrokontroler

Salah satu teknik membangkitkan sebuah sinyal SPWM adalah dengan cara merubah nilai *dutycycle* suatu PWM pada setiap periodenya. Teknik tersebut dilakukan dengan cara membangkitkan gelombang segitiga sebagai gelombang pembawa (*carrier*) dan dibandingkan dengan gelombang sinusoidal oleh sebuah komparator.

Teknik tersebut dapat secara mudah dan ringkas dilakukan oleh sebuah mikrokontroler seperti rangkaian *inverter* SPWM yang telah dikembangkan oleh Ismail dkk [3]. Rangkaian SPWM *inverter* berbasis mikrokontroler yang dikembangkan oleh Ismail dkk, dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 SPWM Inverter Rancangan Ismail dkk [3]

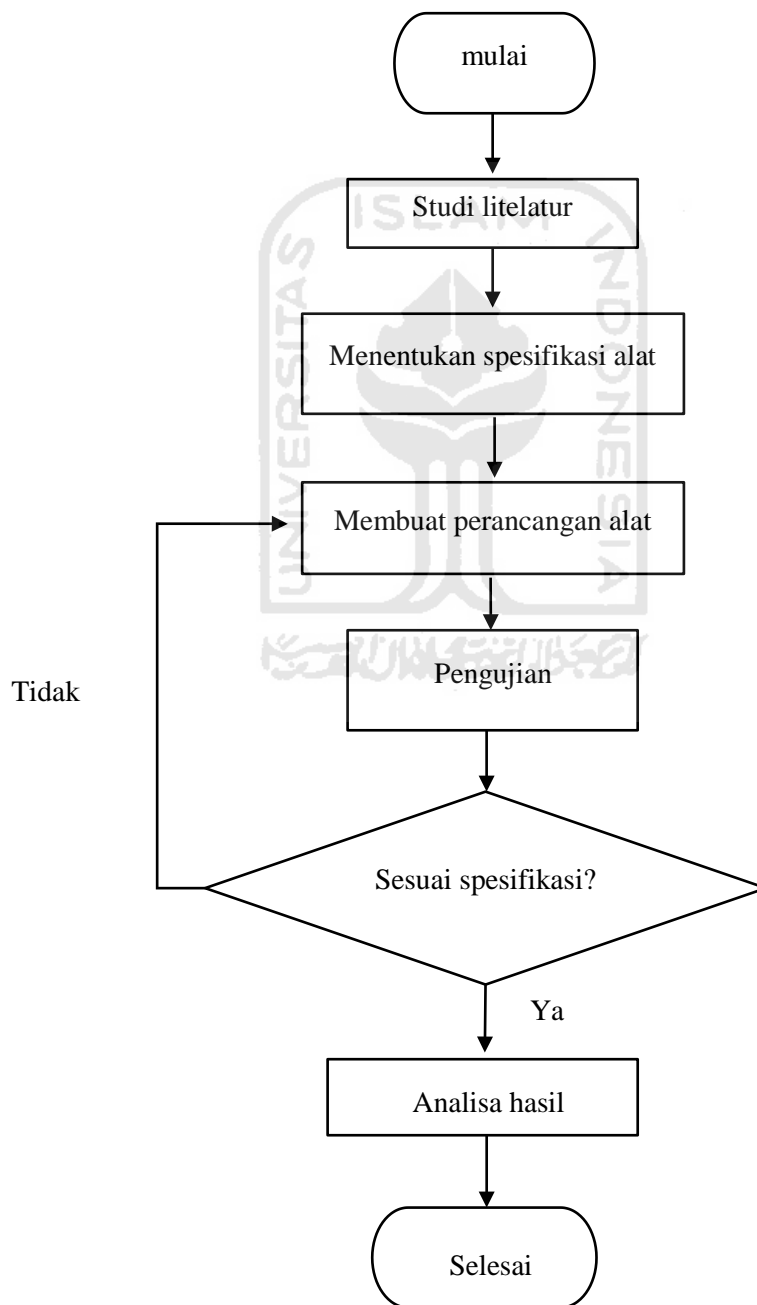
Ismail dkk merancang *inverter* dengan sebuah mikrokontroler berjenis ATmega AT89C2051P sebagai pembangkit gelombang SPWM. AT89C2051P merupakan mikrokontroler tegangan rendah 8 bit dengan 2 kB memori. Mikrokontroler tersebut diprogram untuk menghasilkan sinyal SPWM. Mikrokontroler AT89C2051P digunakan sebagai kontroler rangkaian karena mudah diprogram serta mampu memperkecil pemakaian komponen pendukung jika dibandingkan dengan rangkaian analog berupa pembangkit gelombang segitiga dan komparator. Sinyal SPWM keluaran mikrokontroler AT89C2051P kemudian diteruskan menuju rangkaian isolasi yaitu *optocoupler* SFH618A sebagai pemisah antara rangkaian kontrol dengan rangkaian saklar daya. Sinyal dari *optocoupler* SFH618A kemudian diteruskan menuju komponen IR 2101 sebagai *gate driver* Mosfet dengan konfigurasi *full bridge*. MOSFET berfungsi sebagai saklar elektronis transformator *step-up* sesuai dengan perintah sinyal SPWM yang dihasilkan mikrokontroler AT89C2051P. Sebelum tegangan dinaikkan oleh transformator *step-up* sinyal dari saklar elektronis MOSFET *full bridge* difilter menggunakan *low pass LC filter* untuk memperkecil komponen harmonik atau memperbaiki THD. Keluaran transformator *step-up* adalah tegangan keluaran dari *inverter* tersebut dan dapat dihubungkan ke beban.

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

3.1 Alur Perancangan

Perancangan sistem bertujuan untuk memberikan gambaran bagaimana pembuatan rancangan sistem, spesifikasi alat, dan cara kerja alat yang bertujuan untuk mempermudah dalam analisis dan pengolahan data nantinya. Adapun langkah kegiatan perancangan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut,



Gambar 3.1 Langkah Kegiatan Penelitian

Diagram alir pada gambar 3.1 di atas menjelaskan proses penelitian yang peneliti mulai dari studi literatur hingga analisa hasil. Pada studi literatur peneliti mencari berbagai macam penelitian yang berhubungan dengan *inverter*, PWM, dan *microcontroller*. Setelah mencari beberapa literatur tentang *inverter*, PWM, dan *microcontroller*, peneliti memperoleh gagasan untuk menentukan spesifikasi dari *inverter* yang akan peneliti rancang. Setelah menentukan spesifikasi alat kemudian peneliti merancang sebuah *transformatorless* SPWM *inverter* dengan Arduino yang kemudian peneliti ujicoba. Apabila rancangan tersebut memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan, maka peneliti kemudian menganalisa hasil dari perancangan *inverter* tersebut, apabila belum sesuai spesifikasi, peneliti akan menganalisa parameter-parameter yang tidak sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, kemudian peneliti mencoba memperbaiki parameter mana yang mengakibatkan spesifikasi tidak tercapai.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang penulis gunakan dalam pengujian karakteristik *Transformatorless* SPWM *Inverter* dengan Arduino ini adalah sebagai berikut:

1. Multimeter

Peneliti menggunakan multimeter untuk mengukur tegangan, arus, frekuensi, dan juga *dutycycle*. Multimeter yang penulis gunakan adalah multimeter merek Zoyi ZT102A seperti yang tertera pada gambar 3.2.

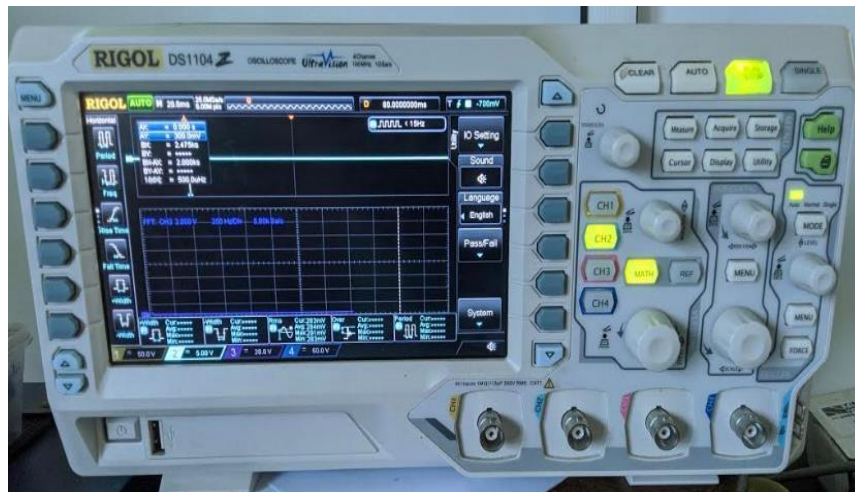


Gambar 3.2 Multimeter

2. Osiloskop

Peneliti menggunakan osiloskop merek Rigol DS1104Z dengan spesifikasi *channel scope* sejumlah 4 *channel*, maksimum input *probe* 300 VRMS, *bandwidth* maksimum 100 MHz,

memiliki fungsi FFT (*Fast Fourier Transform*) dan port USB untuk menyimpan data. Osiloskop tersebut seperti yang tertera pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Osiloskop

3. Beban RLC

Beban RLC merupakan beban yang di dalamnya tersusun atas beban Resistif (R), Induktif (L), dan Kapasitif (C) yang tersusun secara paralel. Beban RLC juga mempunyai saklar selektor untuk menentukan beban apa saja yang akan digunakan. Beban RLC yang penulis gunakan memiliki spesifikasi tegangan input beban 50-220 VAC, 10 selektor beban Resistif, 10 selektor beban Induktif, 10 selektor beban Kapasitif, fungsi voltmeter, amper meter, kWh meter, frekuensi meter, dan $\cos \theta$ meter. Beban RLC yang peneliti gunakan seperti yang tertera pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Beban RLC

3.3 Spesifikasi Alat

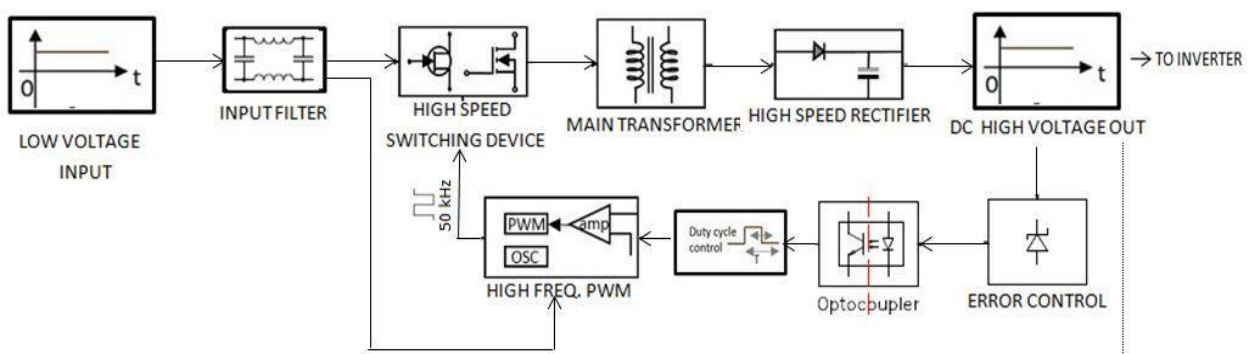
Dari perancangan yang dilakukan oleh penulis, penulis menentukan spesifikasi alat yang dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut ini. Spesifikasi alat ditentukan melalui pengamatan penulis dari pelanggan listrik PLN di Desa Petir, Kecamatan Rongkop, Kabupaten Gunungidul, D.I. Yogyakarta, sewaktu penulis melakukan kegiatan KKN (Kuliah Kerja Nyata) di daerah tersebut.

Tabel 3.1 Spesifikasi Alat

PARAMETER	TETAPAN	SATUAN
Rentang tegangan input	12-15	V
Konsumsi arus tanpa beban	< 500	mA
Tegangan keluaran AC	220	V
Toleransi tegangan keluaran	± 10	%
Daya keluaran maksimal	500	W
Frekuensi tegangan keluaran	50	Hz
THD	< 7	%
COS θ atau PF	> 0,75	
Efisiensi keluaran	> 75	%
Proteksi Keluaran	3	A

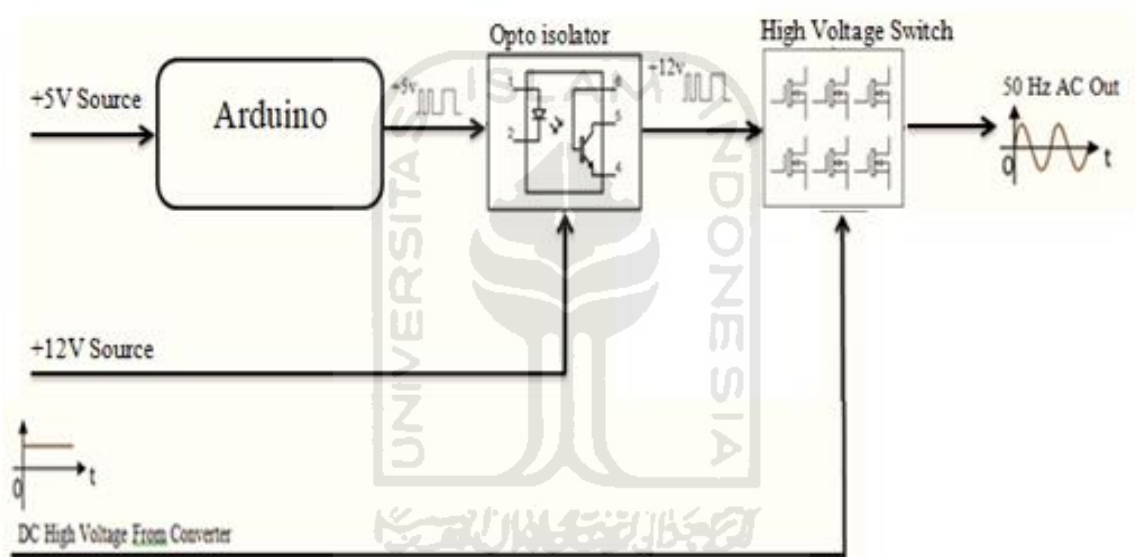
3.4 Blok Diagram Sistem *Inverter*

Pada tahapan ini penulis melakukan perancangan berupa pembuatan blok diagram dari alat, tujuan dari tahapan ini adalah untuk mengetahui bagaimana nantinya alat yang akan dirancang bekerja dan memudahkan dalam menentukan komponen-komponen yang akan digunakan serta memudahkan dalam menentukan spesifikasi dari alat yang akan dibuat. Terdapat dua blok pada perancangan alat yang akan dibuat penulis yaitu **blok konverter** yang dapat dilihat pada gambar 3.5 dan **blok inverter** yang dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.5 Diagram blok konverter

Pada blok ini tegangan input yang berupa tegangan DC akan difilter oleh kapasitor untuk menstabilkan tegangan input kemudian tegangan DC tersebut akan diteruskan ke komponen pensaklar berupa MOSFET dengan frekuensi *switch* sebesar 22 kHz yang dihasilkan oleh IC SG 3525 sebagai PWM, kemudian tegangan yang telah memasuki MOSFET akan diteruskan ke trafo frekuensi tinggi untuk dinaikkan tegangannya. Tegangan keluaran trafo tersebut masih berbentuk gelombang AC dengan frekuensi sebesar 22 kHz sesuai dengan frekuensi PWM namun tegangannya telah di naikkan. Hal tersebut dilakukan guna menghindari penggunaan trafo frekuensi rendah atau berintikan besi yang cenderung memiliki nilai efisiensi yang rendah dan memiliki berat yang besar. Kemudian tegangan keluaran trafo frekuensi tinggi tersebut disearahkan dan difilter oleh bagian *high speed rectifier*, tegangan keluaran dari *rectifier* ini kemudian di *feedback* kan untuk mendapatkan tegangan keluaran yang stabil untuk diteruskan ke blok *inverter*.

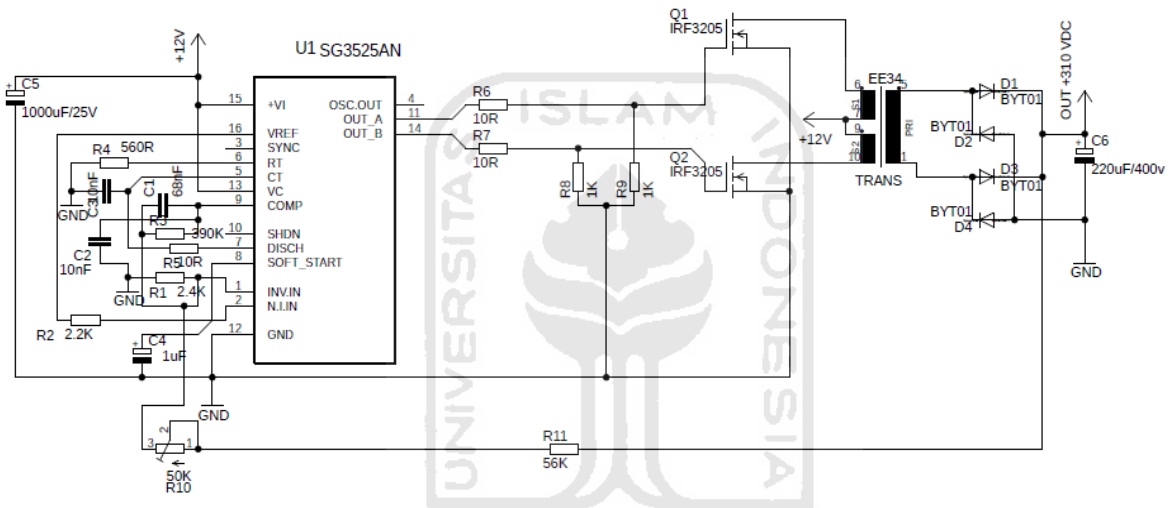


Gambar 3.6 Diagram blok *inverter*

Pada blok ini tegangan tinggi DC sebesar 310VDC keluaran dari blok *converter* akan diubah menjadi tegangan AC sinusoidal. Gelombang AC sinusoidal ini dihasilkan oleh pembangkit PWM pada arduino yang telah diprogram (program terlampir) sinyal PWM yang dihasilkan oleh arduino kemudian diteruskan ke blok *gate driver* untuk memberi isyarat *switch* ke kaki *gate* MOSFET tegangan tinggi. Hasil pensaklaran dari MOSFET tegangan tinggi ini merupakan tegangan keluaran dari alat yang dirancang oleh penulis.

3.5 Rangkaian Sistem *Inverter*

Dari blok diagram sistem inverter, perancang kemudian membuat rancangan rangkaian sistem *inverter* sesuai dengan blok diagram. Peneliti Ismail dkk, membuat *inverter* dengan input tegangan rendah sehingga membutuhkan transformator *step-up* dengan inti besi untuk menaikkan tegangan keluarannya ke level yang diinginkan. *Inverter* tersebut memiliki kekurangan yaitu berat dan memiliki rugi-rugi inti serta rugi-rugi arus eddy yang besar. Untuk mengatasi hal tersebut, pada penelitian ini perancang membangun sebuah rangkaian DC-DC konverter untuk menaikkan tegangan input dari 12VDC ke 310VDC untuk kemudian tegangan tersebut dirubah ke tegangan AC pada rangkaian *inverter*. Rangkaian DC-DC konverter tersebut tertera pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Skema Rangkaian DC-DC Konverter

Pada rangkaian tersebut digunakan IC SG 3525 sebagai pembangkit PWM, frekuensi yang dihasilkan PWM pada rangkaian tersebut sesuai dengan persamaan 3.1 berikut sesuai *datasheet* IC SG 3525 [12].

$$f_{osc} = \frac{1}{CT(0.7RT+3Rd)} \quad (3.1)$$

Dimana,

f_{osc} = Oscillation frequency PWM dalam (Hz)

C_T = kapasitor *timing* dalam Farad (F)

R_T = resistor *timing* dalam Ohm (Ω)

R_d = resistor *discharge* dalam Ohm (Ω)

Perancang menggunakan nilai C_T sebesar 10nF, R_T 560 Ω , dan R_d 10 Ω , maka frekuensi PWM sebesar 23.696 kHz. Keluaran dari PWM yang dibangkitkan oleh IC SG 3525 kemudian diteruskan ke bagian pensaklar elektronis MOSFET IRF3205 dengan konfigurasi *half bridge*.

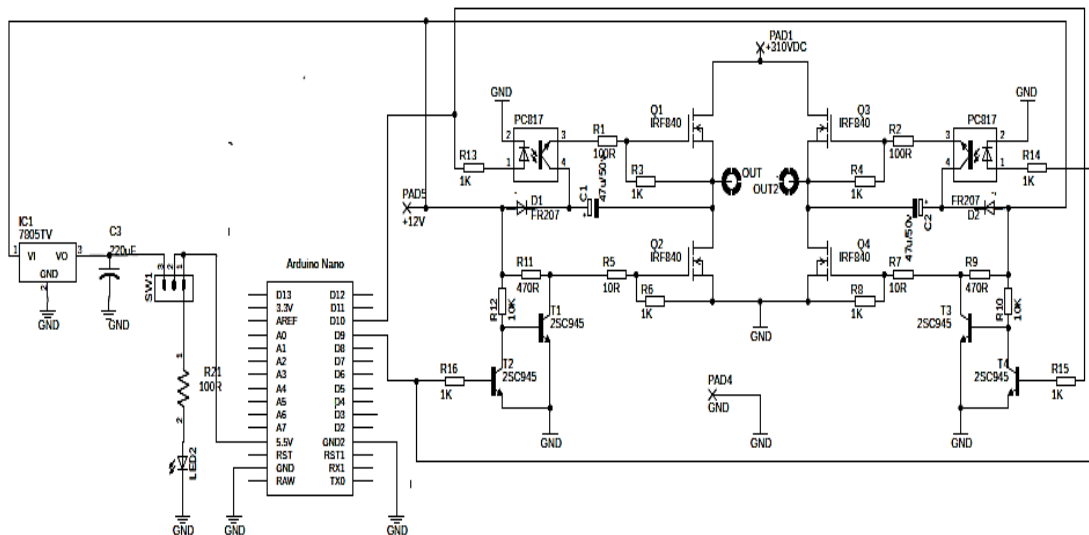
Dari bagian pensaklar elektronis MOSFET, tegangan input dinaikkan tegangannya melalui transformator frekuensi tinggi tipe EE 34. Daftar komponen yang digunakan pada rangkaian DC-DC konverter tertera pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Daftar Komponen Rangkaian DC-DC Konverter

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
U1	SG3525	Pembangkit PWM	-	-
Arduino	Arduino nano	Pembangkit SPWM	-	-
R1	2,4 k Ω	Pembagi tegangan pin <i>feedback control</i>	Nilai tegangan keluaran menurun dari nilai yang ditentukan	Nilai tegangan keluaran naik dari nilai yang ditentukan
R2	2,2 k Ω	<i>Resistor</i> pembatas arus pin <i>feedback comparator</i>	-	-
R3	390 k Ω	<i>Resistor</i> kompensasi <i>feedback</i>	Proses <i>feedback</i> semakin cepat, tetapi transien semakin besar	Proses <i>feedback</i> semakin lambat, tetapi transien semakin kecil
R4 (Rt)	560 Ω	<i>Timing Resistor</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
R5 (Rd)	10 Ω	<i>Discharge Resistor</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
R6, R7	10 Ω	Resistor pembatas arus pin <i>gate</i> Mosfet	-	-
R8, R9	1k Ω	Resistor <i>pull-down</i>	-	-
R10	VR 20 k Ω	<i>Resistor feedback control</i>	-	-
R11	56 k Ω	<i>Resistor feedback control</i>	Nilai tegangan keluaran naik dari nilai yang ditentukan	Nilai tegangan keluaran turun dari nilai yang ditentukan

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
C1	68nF-100nF	Kapasitor kompensasi <i>feedback</i>	Proses <i>feedback</i> semakin lambat, tetapi transien semakin kecil	Proses <i>feedback</i> semakin cepat, tetapi transien semakin besar
C2	10nF	Kapasitor <i>decoupling</i>	-	-
C3(CT)	10nF	Kapasitor <i>timing</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
C4	1uF-22uF	Kapasitor <i>soft start</i>	<i>soft start</i> semakin lama, mengurangi lonjakan arus tetapi tegangan keluaran drop terlalu lama	<i>soft start</i> semakin cepat, menambah lonjakan arus tetapi tegangan cepat mencapai <i>set point</i>
C5	1000uF/25V	Kapasitor <i>filter</i> tegangan masukan	-	Memperbesar riak tegangan
C6	100uF-220uF/400V	Kapasitor <i>filter</i> tegangan keluaran	-	Memperbesar riak tegangan
Q1, Q2	IRF 3205	<i>Half Bridge Switching</i>	-	-
D1, D2, D3, D4	FR307	<i>Fast recovery rectifier diode</i>	-	-

Tegangan tinggi keluaran dari transformator kemudian disearahkan menggunakan dioda seri FR307 sehingga menjadi tegangan DC 310V. Tegangan ini akan di *feedback* menuju pin *feedback comparator* IC SG 3525 untuk mendapatkan tegangan keluaran yang stabil. Tegangan ini juga yang nantinya sebagai tegangan masukan pada bagian blok *inverter*. Pada blok *inverter* dibangkitkan sinyal SPWM menggunakan arduino nano untuk mengubah tegangan 310 VDC keluaran blok converter menjadi tegangan AC 220V. Rangkaian *inverter* dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Skema Rangkaian *Inverter*

Dari skema rangkaian di atas, arduino nano digunakan sebagai komponen yang membangkitkan sinyal SPWM. Sinyal SPWM keluaran arduino kemudian digunakan untuk memerintah komponen pensaklar berupa MOSFET tegangan tinggi. Komponen *optocoupler* PC 817 digunakan sebagai *high side gate driver* MOSFET dan transistor 2SC945 digunakan sebagai *low side gate driver* MOSFET. MOSFET dirangkai dalam konfigurasi *full bridge* dan keluaran dari MOSFET ini merupakan tegangan keluaran dari sistem *inverter* yang dibuat. Daftar komponen yang digunakan pada rangkaian *inverter* dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut.

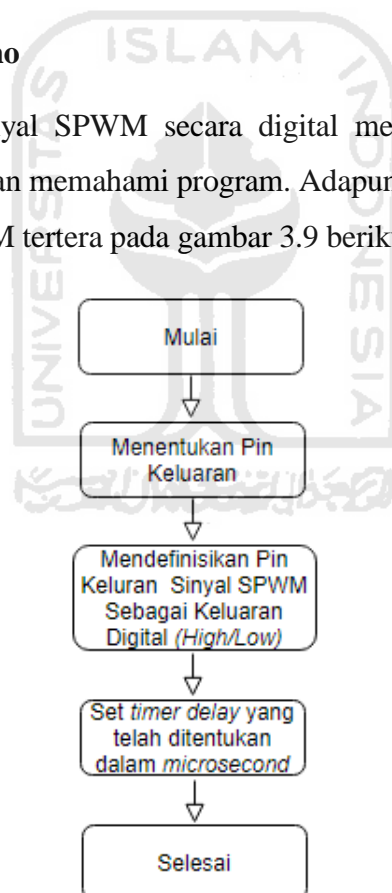
Tabel 3.3 Daftar Komponen Rangkaian *Inverter*

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
IC 1	LM 7805	Regulator 5 V	Arduino panas	-
Arduino	Arduino nano	Pembangkit <i>SPWM</i>	-	-
R1, R2, R5, R7	100 Ω	<i>Gate resistor</i>	MOSFET keadaan <i>cut-off</i>	MOSFET keadaan saturasi
R2, R3, R6, R8	1 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	MOSFET keadaan saturasi	MOSFET keadaan <i>cut-off</i>
R9, R11	470 Ω	<i>Pull-up Resistor</i>	-	-
R10, R12	10 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	MOSFET <i>low-side</i> tidak tertutup	Resistor panas
C1, C2	47 μ F/50 V	Kapasitor <i>bootstrap</i>	Memperkecil osilasi MOSFET	Memperbesar osilasi MOSFET

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
C3	220uF/25V	Filter tegangan	-	Memperbesar riak tegangan
T1, T2, T3, T4	2SC945	Transistor <i>Low side gate driver</i>	-	-
PC1, PC2	PC817	Optocoupler <i>High side gate driver</i>	-	-
Q1, Q2, Q3, Q4	IRF 840	High Voltage <i>H-Bridge Switching</i>	-	-

3.6 Algoritma Program Arduino

Dalam membangkitkan sinyal SPWM secara digital menggunakan arduino, diperlukan sebuah algoritma untuk memudahkan memahami program. Adapun algoritma dari program arduino untuk membangkitkan sinyal SPWM tertera pada gambar 3.9 berikut.



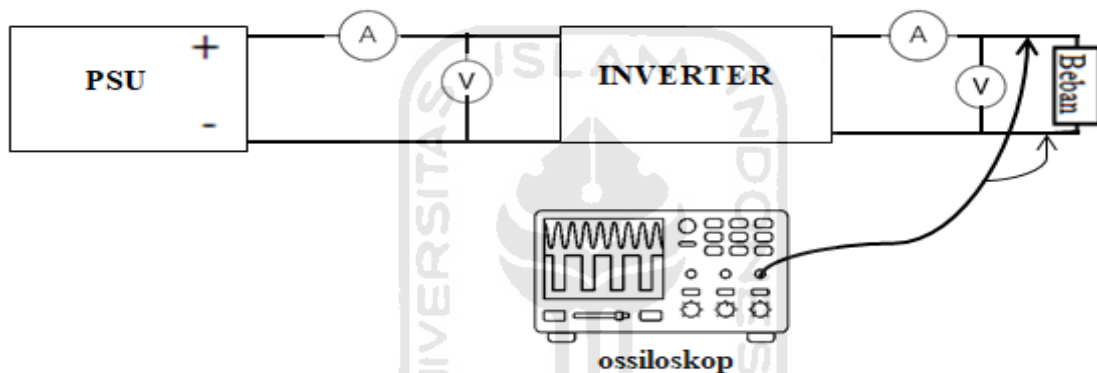
Gambar 3.9 Algoritma Program Arduino

Program dimulai dengan menentukan pin keluaran sinyal SPWM dari perangkat arduino, dalam penelitian ini penulis menggunakan pin D 9 dan D 10. Pin keluaran tersebut kemudian didefinisikan sebagai sinyal keluaran digital dengan keadaan *high* atau *low*. Setelah pin didefinisikan sebagai keluaran digital dengan keadaan *high* atau *low* kemudian pin tersebut diset

timer delay dalam rentang *microsecond*. Program akan berjalan secara berulang (*looping*) ketika arduino diberi tegangan.

3.6 Pengujian Karakterisasi *Inverter*

Pada proses pengujian, alat akan diuji beban menggunakan beban RLC *load* yang ada di Laboratorium Ketenagaan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Pada pengujian karakterisasi *inverter* akan diamati bagaimana arus dan tegangan *input*, arus dan tegangan keluaran serta gelombang keluaran dari alat tersebut. Kemudian akan dianalisa bagaimana karakteristiknya apakah sesuai dengan spesifikasi atau tidak. Apabila tidak sesuai dengan spesifikasi maka akan dilakukan pengecekan ulang pada rangkaian. Skema pengujian karakterisasi *inverter* dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 Skema Pengujian *Inverter*

Pada bagian masukan *inverter* akan dipasang amperemeter DC secara seri dan voltmeter DC yang dipasang secara paralel dengan sumber tegangan $12 \pm 10\%$ VDC dari unit PSU untuk dapat menentukan besarnya daya yang dikonsumsi oleh *inverter*. Selain pada bagian masukan, pada bagian keluaran *inverter* juga dilakukan pemasangan amperemeter AC dan voltmeter AC sebelum titik beban terhubung untuk dapat mengetahui nilai daya yang dihasilkan, serta dapat mengetahui nilai efisiensi *inverter*. Pada bagian keluaran juga dipasang *probe* osiloskop untuk dapat mengetahui bentuk gelombang dan besarnya THD ketika *inverter* beroperasi.

Dari pengujian karakteristik *inverter* akan diketahui data sebagai berikut.

1. Arus dan Tegangan Masukan Ketika *Inverter* tidak diberi Beban dan Ketika *Inverter* Diberi Beban.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui konsumsi daya ketika *inverter* tidak diberi beban yaitu ketika semua selektor pada beban RLC pada posisi *off* dan ketika *inverter* diberi beban yaitu ketika selektor nomor 10 pada beban RLC pada posisi *on*. *Inverter* akan diberi

masukkan tegangan DC sebesar $12V \pm 10\%$. Pada pengujian ini akan didapatkan besaran tegangan dan arus yang dapat digunakan untuk mengetahui daya yang dikonsumsi *inverter*. Daya input *inverter* dapat ditentukan melalui persamaan 3.2 berikut.

$$P = V \times I \quad (3.2)$$

2. Arus dan Tegangan Keluaran Ketika *Inverter* tidak diberi Beban dan Ketika *Inverter* Diberi Beban.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui berapa besar daya yang diserap oleh beban RLC yang terhubung dengan *inverter*. Pada pengujian ini *inverter* akan diberi masukkan tegangan DC sebesar $12V \pm 10\%$ dan pada bagian keluarannya akan dibebankan beban RLC dengan mengaktifkan selektor nomor 10 beban RLC secara bertahap mulai dari beban resistif (R) sebesar 80-115 Ω pada selektor nomor 10, induktif (L) sebesar 10-18 mH dan kapasitif (C) sebesar 2,2-8uF pada selektor nomor 10. Untuk mengetahui konsumsi daya pada beban yang terhubung dengan sumber arus AC maka dapat ditentukan melalui persamaan 3.3 berikut.

$$P = V \times I \times \cos\theta \quad (3.3)$$

3. Gelombang Output (THD) *Inverter* ketika diberi beban RLC.

Pembebanan pada *inverter* akan mempengaruhi bentuk gelombang keluaran dari *inverter* tersebut, pengujian ini dilakukan guna mengetahui bagaimana kualitas gelombang keluaran *inverter* dan bagaimana penyimpangan bentuk gelombang keluaran terhadap gelombang fundamentalnya. Pada pengujian ini *inverter* akan diberi masukkan tegangan DC sebesar $12V \pm 10\%$ dan pada bagian keluarannya akan dibebankan beban RLC dengan mengaktifkan selektor nomor 10 beban RLC dari beban resistif (R), induktif (L) dan kapasitif (C) secara bersamaan.

4. Efisiensi *Inverter*.

Dengan melakukan perbandingan antara daya keluaran terhadap daya masukan maka akan didapatkan nilai efisiensi dari sebuah *inverter*. Efisiensi dari *inverter* dapat dirumuskan seperti persamaan 3.4 berikut.

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Dimana,

η = efisiensi alat

P_{in} = Daya Masukan

P_{out} = Daya Keluaran

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Daya *Inverter*

Pada pengujian ini akan dilakukan beberapa pembebanan terhadap *inverter* dengan menggunakan beban RLC. Dari pengujian beban RLC akan didapat beberapa parameter mengenai tegangan dan arus masukan *inverter*, tegangan dan arus keluaran *inverter*, frekuensi *inverter*, *dutycycle* dari PWM, dan nilai $\cos \theta$ dari setiap beban. Data yang didapatkan nantinya akan digunakan untuk mengetahui daya dan efisiensi dari *inverter*.

4.1.1 Pengujian *Inverter* Tanpa Beban

Pengujian pertama dilakukan dengan cara menghubungkan *inverter* pada sumber tegangan DC pada bagian masukan dan tanpa membebani *inverter* dengan beban apapun pada bagian keluarannya. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data mengenai berapa daya yang dibutuhkan *inverter* ketika tidak dibebani, tabel 4.1 berikut menunjukkan beberapa parameter saat *inverter* berjalan tanpa pembebanan pada keluarannya.

Tabel 4.1 Parameter Pengujian *Inverter* Tanpa Beban

Parameter	Nilai	Satuan
I_{masuk}	168,17	mA
V_{masuk}	12,3	V
V_{keluar}	222,9	V
<i>Dutycycle</i>	50,6	%
Frekuensi	50,348	Hz

Dari pengujian *inverter* ketika tidak dibebani didapatkan beberapa parameter berupa arus masukan *inverter*, tegangan masukan *inverter*, tegangan keluaran *inverter*, *dutycycle* pada PWM *inverter*, dan frekuensi *inverter*. Parameter yang didapatkan tersebut dapat digunakan untuk menghitung konsumsi daya dari *inverter* ketika tidak diberi beban. Daya yang diserap oleh *inverter* dapat dihitung sesuai dengan persamaan 3.2 yaitu $P = V \times I$ dimana tegangan dalam satuan volt dan arus dalam satuan ampere, maka daya yang dikonsumsi *inverter* saat tidak dibebani adalah 2,0684W. Daya *inverter* tersebut termasuk kecil karena *inverter* tidak menggunakan trafo inti besi yang cenderung memiliki nilai efisiensi yang rendah. *Inverter* yang diuji menggunakan trafo inti ferit dimana memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan trafo inti besi. Nilai *dutycycle* menunjukkan nilai perbandingan T_{ON} dan

T_{OFF} pada PWM blok konverter, sedangkan nilai frekuensi sebesar 50,348 Hz merupakan nilai frekuensi output *inverter* ketika beban tidak terhubung.

4.1.2 Pengujian *Inverter* dengan Beban R

Pengujian kedua dilakukan dengan cara menghubungkan *inverter* dengan sumber tegangan DC pada bagian masukan dan menghubungkan beban berupa resistor pada bagian keluaran dari *inverter*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi dari *inverter* ketika dibebani dengan beban resistif, mengetahui tegangan dan arus masukan, mengetahui nilai $\cos \theta$, dan mengetahui tegangan dan arus keluaran *inverter*. Beberapa parameter yang didapatkan pada pengujian ini tertera pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Parameter pengujian *inverter* dengan beban R

Parameter	Nilai	Satuan
I_{masuk}	3	A
V_{masuk}	11,80	V
I_{keluar}	150	mA
V_{keluar}	218,7	V
Dutycycle	53	%
Cos θ	0,92	-
Frekuensi	50,304	Hz
P_{masuk}	35,40	W
P_{keluar}	30,180	W
Efisiensi	85,25	%

Dari pengujian *inverter* dengan beban resistif didapatkan parameter yang tertera pada tabel 4.2. Dari data tersebut, *inverter* menyerap daya masukan sebesar $P = V \times I$ dimana V dalam satuan volt dan I dalam satuan ampere maka *inverter* mengkonsumsi daya untuk menyuplai beban sebesar 35,40W. Sementara pada bagian keluaran, beban resistif menyerap daya sesuai dengan persamaan 3.3 yaitu $P = V \times I \times \cos \theta$, dimana V dalam volt dan I dalam ampere maka daya keluaran *inverter* atau daya yang diserap beban resistif sebesar 30,180W. Pada parameter di atas, nilai $\cos \theta$ atau PF (*Power Factor*) tidak mutlak bernilai 1 karena di dalam beban resistif terdapat juga belitan penghantar pada batang karbon yang dapat bernilai sebagai nilai induktif pada beban resistif tersebut. Sementara untuk efisiensi dari *inverter* tersebut dapat diketahui melalui persamaan 3.4 yaitu $\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\%$, dimana P_{in} dan P_{out} dalam watt maka efisiensi dari *inverter* dengan beban resistif sebesar 85,25%. Sementara nilai *dutycycle* pada bagian PWM naik menjadi 53% karena pada bagian pensaklar elektronik yang dalam perancangan ini digunakan MOSFET mengalami pembebanan sehingga pin *feedback* dari IC PWM menaikkan lama T_{ON}

untuk memperbesar arus yang masuk pada trafo ferit sehingga nilai tegangan output akan stabil pada rentang yang telah ditentukan.

4.1.3 Pengujian *Inverter* dengan Beban RL

Pada pengujian ketiga *inverter* dibebani menggunakan beban berjenis resistif dan induktif. Sifat beban RL, menjadi beban paling banyak dalam dunia ketenagaan. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan *inverter* dengan sumber tegangan DC pada bagian masukan dan menghubungkan beban berupa resistor dan induktor yang terpasang secara paralel pada bagian keluaran dari *inverter*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi dari *inverter* ketika dibebani dengan beban bersifat resistif dan induktif, mengetahui tegangan dan arus masukan, mengetahui nilai $\cos \theta$, dan mengetahui tegangan dan arus keluaran *inverter*. Beberapa parameter yang didapatkan pada pengujian ini tertera pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Parameter pengujian *inverter* dengan beban RL

Parameter	Nilai	Satuan
I_{masuk}	4,7	A
V_{masuk}	11,32	V
I_{keluar}	243	mA
V_{out}	219,3	V
Dutycycle	54,6	%
Frekuensi	50,3	Hz
Cos θ	0,82	-
P_{masuk}	52,64	W
P_{keluar}	43,69	W
Efisiensi	82,9	%

Dari pengujian *inverter* dengan beban resistif dan induktif didapatkan parameter yang tertera pada tabel 4.3. Dari data tersebut, *inverter* menyerap daya masukan sebesar $P = V \times I$ dimana V dalam satuan volt dan I dalam satuan amper maka *inverter* mengkonsumsi daya untuk menyuplai beban sebesar 52,64W. Sementara pada bagian keluaran, beban RL menyerap daya sesuai dengan persamaan 3.3 yaitu $P = V \times I \times \cos \theta$, dimana V dalam volt dan I dalam arus maka daya keluaran *inverter* atau daya yang diserap beban RL sebesar 43,69 W. Nilai $\cos \theta$ atau PF pada pengujian tersebut adalah 0,82, dimana nilai tersebut merupakan selisih sudut antara daya aktif (W) dan daya semu (S) pada beban RL yang diuji. Semakin nilai $\cos \theta$ atau PF mendekati nilai 1, maka akan semakin baik. Untuk efisiensi dari *inverter* sesuai dengan persamaan 3.4 yaitu $\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\%$, maka didapatkan hasil 82,9 %. Nilai *dutycycle* dari

PWM meningkat menjadi 54,6 %, hal ini untuk mengkompensasi penurunan tegangan (*feedback*) pada bagian keluaran agar tetap pada tegangan yang telah ditentukan.

4.1.4 Pengujian *Inverter* dengan Beban RLC

Pada pengujian keempat *inverter* dibebani menggunakan beban berjenis resistif, induktif, dan kapasitif. Dalam ketenagalistrikan penambahan beban C dilakukan untuk meningkatkan nilai $\cos \theta$ atau PF dari suatu sistem beban. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan *inverter* dengan sumber tegangan DC pada bagian masukan dan menghubungkan beban berupa resistor, induktor, dan kapasitor yang terpasang secara paralel pada bagian keluaran dari *inverter*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi dari *inverter* ketika dibebani dengan beban bersifat RLC, mengetahui tegangan dan arus masukan, mengetahui nilai $\cos \theta$, dan mengetahui tegangan dan arus keluaran *inverter*. Beberapa parameter yang didapatkan pada pengujian ini tertera pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Parameter pengujian *inverter* dengan beban RLC

Parameter	Nilai	Satuan
I_{masuk}	4,78	A
V_{masuk}	11,35	V
I_{keluar}	240	mA
V_{keluar}	221,7	V
<i>Dutycycle</i>	51,3	%
Frekuensi	50,37	Hz
$\cos \theta$	0,87	-
P_{masuk}	54,25	W
P_{keluar}	46,29	W
Efisiensi	85,32	%

Dari pengujian beban RLC didapatkan parameter seperti pada tabel 4.4. *Inverter* mengkonsumsi daya sebesar $P = V \times I$ dimana V dalam satuan volt dan I dalam amper, maka *inverter* tersebut mengkonsumsi daya sebesar 54,25W untuk menyuplai beban RLC. Sementara pada bagian keluaran, beban RLC menyerap daya sesuai dengan persamaan 3.3 yaitu $P = V \times I \times \cos \theta$, dimana V dalam volt dan I dalam arus maka daya keluaran *inverter* atau daya yang diserap beban RLC sebesar 46,29W. Pada pengujian beban RLC terjadi kenaikan nilai $\cos \theta$, karena sifat dari beban kapasitif adalah menyuplai beban reaktif yang diserap oleh induktif sebagai kompensasi proses magnetisasi kumparan. Dengan kata lain kapasitor bersifat *leading* sementara induktor bersifat *lagging* sehingga dapat memperbaiki nilai faktor daya atau $\cos \theta$. Nilai *dutycycle* sedikit menurun dibandingkan pengujian beban sebelumnya karena nilai tegangan keluaran naik, penurunan tersebut berakibat pada T_{ON} pada PWM berkurang.

4.2 Pengujian Gelombang Keluaran *Inverter*

Pada pengujian ini akan dilakukan pengamatan gelombang keluaran dari *inverter* ketika dibebani menggunakan beban RLC. Pengamatan gelombang menggunakan fungsi FFT yang ada pada osiloskop Rigol DS1104Z. Pengamatan gelombang ini akan dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang dan nilai THD pada *inverter*.

Pengujian Gelombang Keluaran *Inverter* Beban RLC

Pengujian pertama dilakukan dengan cara menghubungkan keluaran dari *inverter* ke osiloskop dan beban RLC. Kemudian pada bagian masukan *inverter* diberi catu daya DC sehingga *inverter* bekerja. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang dan nilai THD dari *inverter* ketika dibebani beban RLC. Bentuk gelombang *inverter* ketika dibebani beban RLC dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Gelombang keluaran *inverter* dan parameter FFT

Dari pengujian *inverter* dengan beban RLC tersebut, dapat diketahui bentuk gelombang *inverter* tersebut adalah gelombang sinus dengan memiliki komponen harmonik. Pada gambar juga dapat diketahui nilai frekuensi keluaran *inverter* yaitu 50 Hz, nilai tegangan puncak sebesar 32,8 V pada posisi *probe* osiloskop 10X sehingga nilai tegangan puncak adalah 320,8 V puncak atau dalam RMS bernilai 226,8 V dan parameter FFT yang nantinya dapat digunakan untuk menghitung nilai THD. Parameter FFT pada pengujian menunjukkan nilai dBV pada frekuensi

fundamental dan frekuensi harmoniknya. Parameter FFT pada pengujian tersebut tersaji pada tabel 4.5 berikut

Tabel 4.5 Parameter FFT

Frekuensi (Hz)	Harmonik ke -	Amplitudo (dBc)	Absolute Power Ratio (dBm)
100	2	-46	$2,511 \times 10^{-5}$
150	3	-26,6	0,0021
200	4	-26,6	0,0021
250	5	-37,8	0,000165
300	6	-26	0,0021
350	7	-26	0,0021
400	8	-26	0,0021
450	9	-51,8	$6,606 \times 10^{-6}$
500	10	-26	0,0021
Total			0,0127

Dari data tersebut maka nilai THD dari gelombang keluaran dari pengujian *inverter* tanpa beban adalah sesuai dengan persamaan 2.2 yaitu $THD(\%) = 100 \times \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}$, dimana nilai p_n^2 sebanding dengan $10^{\left(\frac{dBc}{10}\right)}$ maka nilai THD dari *inverter* tersebut adalah 11,26%. Nilai THD tersebut lebih besar daripada nilai THD pada pengujian rancangan *inverter* yang dilakukan oleh Ismail dkk, karena pada penelitian ini perancang tidak melakukan perancangan *filter* gelombang *inverter* secara mendetail. Menurut standar IEEE (519-1992) batas THD tegangan untuk rentang di bawah 69kV adalah 5 %.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa

1. Transformatorless SPWM *inverter* dengan arduino berhasil dibuat dengan teknik menaikkan tegangan dari tegangan masukan sebesar 12VDC menjadi 310VDC pada blok konverter, kemudian tegangan tinggi keluaran blok konverter ini diubah menjadi tegangan AC 220V menggunakan pensaklar elektronis berupa MOSFET dengan konfigurasi *H-Bridge* dengan teknik modulasi SPWM menggunakan Arduino.
2. Teknik pembangkitan SPWM dengan arduino adalah dengan cara memprogram arduino untuk membangkitkan PWM dengan nilai *dutycycle* yang berubah setiap periodenya.
3. *Inverter* tersebut memiliki tegangan keluaran 220VAC \pm 10%, frekuensi keluaran 50 Hz, nilai efisiensi >80%, dan THD sebesar 11,26%. Secara keseluruhan performa *inverter* sesuai spesifikasi, hanya saja THD *inverter* tersebut yang melenceng jauh dari spesifikasi sebesar 4,26 % karena peneliti tidak melakukan perancangan *filter* seperti yang dilakukan oleh peneliti Ismail dkk.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, penulis berharap penelitian ini bisa dikembangkan lagi oleh mahasiswa periode selanjutnya. Pengembangannya berupa yang tertera sebagai berikut.

1. Perancangan *filter* pada bagian keluaran *inverter* untuk memperbaiki nilai THD gelombang keluaran.
2. Menambahkan *feedback* pada bagian blok *inverter*, karena pada perancangan ini penulis hanya menambahkan *feedback* pada bagian blok converter, agar tegangan keluaran semakin stabil.
3. Menambahkan program monitoring pada arduino agar dapat memonitor daya masuk dan daya keluar, tegangan masuk dan tegangan keluar, konsumsi energi total pada *inverter*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Ross and A. L. Pina, "Application of epoch-era analysis to the selection of a distributed power generation system," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 153, pp. 325–334, 2019.
- [2] N. Hatziargyriou, H. Asano, ... R. I-I. power and energy, and U. 2007, "Microgrids," *feihu.eng.ua.edu*.
- [3] B. Ismail, S. Taib, A. R. M. Saad, M. Isa, and C. M. Hadzer, "Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter," in *First International Power and Energy Conference, (PECon 2006) Proceedings*, 2006, pp. 437–440.
- [4] K. Al-Anbarri, R. Ramanujam, R. Saravanaselvan, and K. Kuppusamy, "Effect of iron core loss nonlinearity on chaotic ferroresonance in power transformers," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2003.
- [5] Y. Bo, L. Wuhua, G. Yunjie, C. Wenfeng, and H. Xiangning, "Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 752–762, 2012.
- [6] Y. Birbir, K. Yurtbasi, and V. Kanburoglu, "Design of a single-phase SPWM inverter application with PIC micro controller," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 592–599, Apr. 2019.
- [7] U.A.Bakshi A.P.Godse, in *Electronic Circuits*, 1st ed., Technical Publication Pune, 2009.
- [8] L. Ibarra, P. Ponce, and A. Molina, "Generalized d-q frame PWM strategy for three-phase electric machinery," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 3, pp. 1–7, 2015.
- [9] W. Kester, "Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+ N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor," *Analog Devices Tutorial, MT-003, Rev. A*, pp. 2–9, 2009.
- [10] Microsemi, "Basic Total Harmonic Distortion (THD) Measurement," Application Note 30 (AN 30), Micosemi Corp, 2015.
- [11] T. D. K. Corporation and K. Yasuhara, "Technology Trends of Ferrite Cores and Their Applications," pp. 1–4, 2010.
- [12] R. Pulse and W. Modulators, "Sg2525a sg3525a," *Test*, no. June, pp. 1–13, 2000.
- [13] R. Dogga and M. K. Pathak, "Recent trends in solar PV inverter topologies," *Solar Energy*, vol. 183, pp. 57–73, May-2019.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Arduino

inverter_modified | Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.42.0)

File Edit Sketch Tools Help

```
inverter_modified

void setup() {
  pinMode(9, OUTPUT); // definisi untuk pin output arduino
  pinMode(10, OUTPUT); // definisi untuk pin output arduino
}

void loop() {
  {
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    delayMicroseconds(1500);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, LOW);
    }
    delayMicroseconds(75);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, HIGH);
    }
    delayMicroseconds(50);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, LOW);
    }
    delayMicroseconds(150);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, HIGH);
    }
    delayMicroseconds(125);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, LOW);
    }
    delayMicroseconds(200);
    {
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, HIGH);
    }
  }
}
```



```

delayMicroseconds (150);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}
delayMicroseconds (300);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, HIGH);
}
delayMicroseconds (250);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}
delayMicroseconds (400);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, HIGH);
}
delayMicroseconds (300);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}

delayMicroseconds (250);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}
delayMicroseconds (400);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, HIGH);
}
delayMicroseconds (300);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}

delayMicroseconds (650);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, HIGH);
}
delayMicroseconds (550);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, LOW);
}
delayMicroseconds (900);
{
digitalWrite (9, HIGH);
digitalWrite (10, HIGH);
}
}

```



```
delayMicroseconds(750);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
delayMicroseconds(650);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
delayMicroseconds(600);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
delayMicroseconds(400);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
delayMicroseconds(300);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}

delayMicroseconds(300);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
delayMicroseconds(250);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
delayMicroseconds(200);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
}
delayMicroseconds(175);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
}
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
delayMicroseconds(150);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
}
```



```

delayMicroseconds(125);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
}
delayMicroseconds(75);
{
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
}
delayMicroseconds(50);
////////////////////
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(1500);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(75);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(50);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(150);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(125);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(200);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(175);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}

```



```

delayMicroseconds(900);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(750);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(700);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(550);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(400);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(300);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(300);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(250);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
delayMicroseconds(200);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
}
delayMicroseconds(175);
{
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
}
}

```




```

delayMicroseconds (150);
{
digitalWrite (10, HIGH);
digitalWrite (9, HIGH);
}
delayMicroseconds (125);
{
digitalWrite (10, HIGH);
digitalWrite (9, LOW);
}
delayMicroseconds (75);
{
digitalWrite (10, HIGH);
digitalWrite (9, HIGH);
}
delayMicroseconds (50);
}

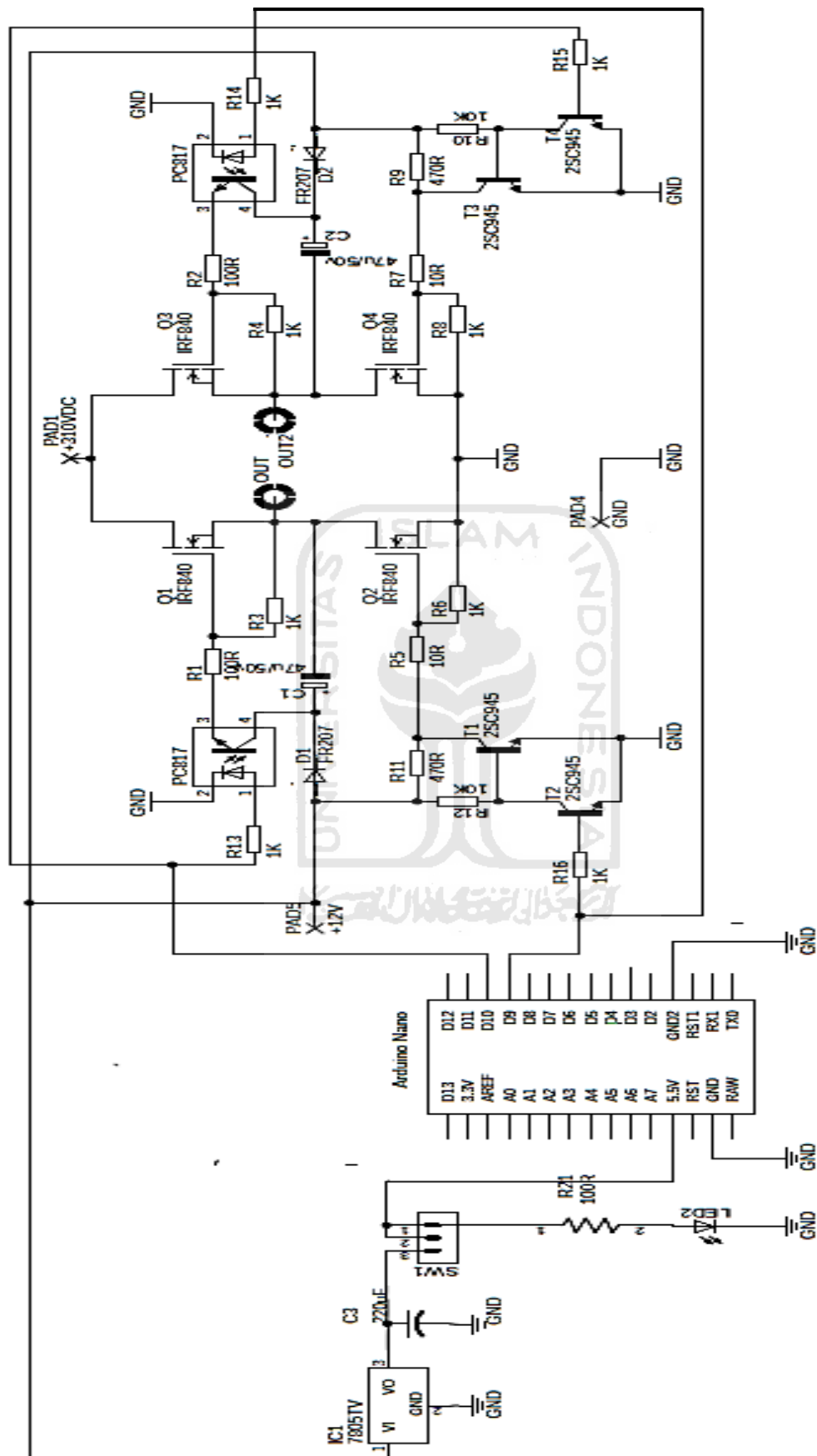
```

Done compiling.

Lampiran 2 Daftar komponen Blok Inverter

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
IC 1	LM 7805	Regulator 5 V	Arduino panas	-
Arduino	Arduino nano	Pembangkit <i>SPWM</i>	-	-
R1, R2, R5, R7	100 Ω	<i>Gate resistor</i>	Mosfet keadaan <i>cut-off</i>	Mosfet keadaan saturasi
R2, R3, R6, R8	1 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	Mosfet keadaan saturasi	Mosfet keadaan <i>cut-off</i>
R9, R11	470 Ω	<i>Pull-up Resistor</i>	-	-
R10, R12	10 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	Mosfet <i>low-side</i> tidak tertutup	Resistor panas
C1, C2	47uF/50 V	Kapasitor <i>bootstrap</i>	Memperkecil osilasi Mosfet	Memperbesar osilasi Mosfet
C3	220uF/25V	<i>Filter</i> tegangan	-	Memperbesar riak tegangan
T1, T2, T3, T4	2SC945	Transistor <i>Low side gate driver</i>	-	-
PC1, PC2	PC817	<i>Optocoupler High side gate driver</i>	-	-
Q1, Q2, Q3, Q4	IRF 840	<i>High Voltage H-Bridge Switching</i>	-	-

Lampiran 3 Rangkaian Blok Inverter

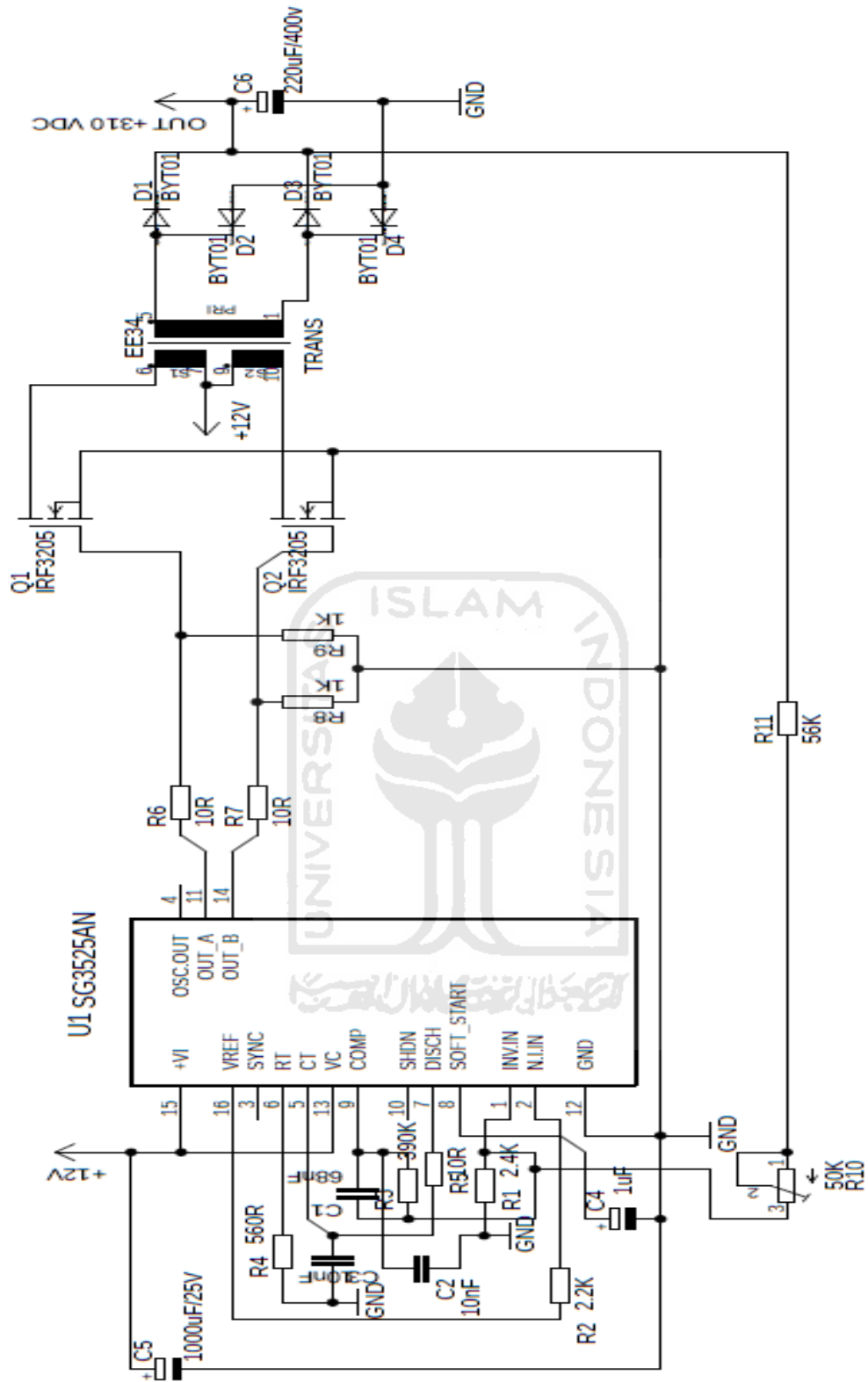


Lampiran 4 Daftar komponen Blok Converter

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
U1	SG3525	Pembangkit PWM	-	-
Arduino	Arduino nano	Pembangkit <i>SPWM</i>	-	-
R1	2,4 k Ω	Pembagi tegangan pin <i>feedback control</i>	Nilai tegangan keluaran menurun dari nilai yang ditentukan	Nilai tegangan keluaran naik dari nilai yang ditentukan
R2	2,2 k Ω	<i>Resistor</i> pembatas arus pin <i>feedback comparator</i>	-	-
R3	390 k Ω	<i>Resistor</i> kompensasi <i>feedback</i>	Proses <i>feedback</i> semakin cepat, tetapi transien semakin besar	Proses <i>feedback</i> semakin lambat, tetapi transien semakin kecil
R4 (RT)	560 Ω	<i>Timing Resistor</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
R5 (Rd)	10 Ω	<i>Discharge Resistor</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
R6, R7	10 Ω	Resistor pembatas arus pin <i>gate</i> Mosfet	-	-
R8, R9	1k Ω	Resistor <i>pull-down</i>	-	-
R10	VR 20 k Ω	<i>Resistor feedback control</i>	-	-
R11	56 k Ω	<i>Resistor feedback control</i>	Nilai tegangan keluaran naik dari nilai yang ditentukan	Nilai tegangan keluaran turun dari nilai yang ditentukan

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
C1	68nF-100nF	Kapasitor kompensasi <i>feedback</i>	Proses <i>feedback</i> semakin lambat, tetapi transien semakin kecil	Proses <i>feedback</i> semakin cepat, tetapi transien semakin besar
C2	10nF	Kapasitor <i>decoupling</i>	-	-
C3(CT)	10nF	Kapasitor <i>timing</i>	Frekuensi keluaran PWM semakin kecil	Frekuensi keluaran PWM semakin besar
C4	1uF-22uF	Kapasitor <i>soft start</i>	<i>soft start</i> semakin lama, mengurangi lonjakan arus tetapi tegangan keluaran drop terlalu lama	<i>soft start</i> semakin cepat, menambah lonjakan arus tetapi tegangan cepat mencapai <i>set point</i>
C5	1000uF/25V	Kapasitor <i>filter</i> tegangan masukan	-	Memperbesar riak tegangan
C6	100uF-220uF/400V	Kapasitor <i>filter</i> tegangan keluaran	-	Memperbesar riak tegangan
Q1, Q2	IRF 3205	<i>Half Bridge Switching</i>	-	-
D1, D2, D3, D4	FR307	<i>Fast recovery rectifier diode</i>	-	-

Lampiran 4 Rangkaian Blok DC-DC Converter



Lampiran 5 Daftar komponen Blok Inverter

Komponen	Rekomendasi nilai	Fungsi	Lebih besar dari rekomendasi nilai	Lebih kecil dari rekomendasi nilai
IC 1	LM 7805	Regulator 5 V	Arduino panas	-
Arduino	Arduino nano	Pembangkit <i>SPWM</i>	-	-
R1, R2, R5, R7	100 Ω	<i>Gate resistor</i>	MOSFET keadaan <i>cut-off</i>	MOSFET keadaan saturasi
R2, R3, R6, R8	1 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	MOSFET keadaan saturasi	MOSFET keadaan <i>cut-off</i>
R9, R11	470 Ω	<i>Pull-up Resistor</i>	-	-
R10, R12	10 k Ω	<i>Pull-down Resistor</i>	MOSFET <i>low-side</i> tidak tertutup	Resistor panas
C1, C2	47 μ F/50 V	Kapasitor <i>bootstrap</i>	Memperkecil osilasi MOSFET	Memperbesar osilasi MOSFET
C3	220 μ F/25V	<i>Filter</i> tegangan	-	Memperbesar riak tegangan
T1, T2, T3, T4	2SC945	Transistor <i>Low side gate driver</i>	-	-
PC1, PC2	PC817	<i>Optocoupler High side gate driver</i>	-	-
Q1, Q2, Q3, Q4	IRF 840	<i>High Voltage H-Bridge Switching</i>	-	-