

RANCANG BANGUN INVERTER SPWM

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



Disusun oleh:

Novita Desiwantiyani

14524092

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

2018

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN INVERTER SPWM



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

Disusun oleh:

Novita Desiwantiyani
14524092

الجامعة الإسلامية
الاستاذة الأندونيسية

Yogyakarta, 23-08-2018

Menyetujui,

Pembimbing 1

Firmansyah Nur Budiman, S.T., M.Sc.
145240501

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

RANCANG BANGUN INVERTER SPWM

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Novita Desiwantiyani

14524092

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 23 Agustus 2018

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Firmansyah Nur Budiman, S.T., M.Sc.

Anggota Penguji 1: Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.

Anggota Penguji 2: Setyawan Wahyu Pratomo, S.T., M.T.

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

Tanggal: 29 Agustus 2018

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., 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, 23 Agustus 2018



Novita Desiwantiyani

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Alhamdulillahirabbil'alamin, Segala Puji syukur kepada Allah SWT karena atas segala limpahan rahmat, berkat, taufik, hidayah dan karunia nya kepada Penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul Rancang Bangun Inverter SPWM dengan baik. Sholawat dan salam yang tercurah senantiasa kepada Rasulullah SAW hingga mengantarkan manusia dari zaman yang gelap hingga ke zaman benderang saat ini.

Dalam Penyusunan Skripsi / Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat di Universitas Islam Indonesia dalam mencapai Gelar S1 yaitu Sarjana Teknik Elektro. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih ada beberapa kekurangan, namun harapan Penulis semoga melalui laporan skripsi ini, akan bermanfaat kepada Pembaca serta memberi wawasan baru dan bisa menemukan referensi baru untuk judul skripsi pada generasi ke depannya.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini tidak dapat selesai tanpa ada dukungan dari pihak pihak terkait. Maka Penulis mengucapkan terima kasih sebesar - besarnya kepada semua pihak yang telah berpartisipasi memberi dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini sehingga skripsi bisa selesai dengan tepat waktu. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sedalam dalamnya kepada semua pihak yang telah membantu terutama kepada:

1. Orang Tua Penulis. Ibu yang telah memberi dukungan baik dengan doa yang tiada hentinya serta dukungan kepada Penulis agar dapat menyelesaikan skripsi dengan sebaik - baiknya.
2. Kakak Kandung yang telah menyemangati dalam proses berlangsungnya skripsi pada semester ganjil ini.
3. Keluarga yang telah mendukung Penulis agar bisa fokus dalam mengerjakan skripsi.
4. Bapak Firmansyah Nur Budiman,S.T.,M.Sc selaku pembimbing yang telah membimbing dan memberikan ilmu tambahan serta memberi solusi terhadap permasalahan kepada Penulis dari awal pengerjaan skripsi hingga waktu penyelesaian skripsi.
5. Bapak Yusuf Aziz Amrullah,S.T.,M.Sc.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
6. Bapak Medilla Kusriyanto,S.T.,M.Eng selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro yang telah memberi pengarahan dalam pelaksanaan tugas akhir.

7. Seluruh Dosen dan Staff Teknik Elektro yang telah membantu Penulis dalam proses masa studi.
8. Seluruh Teman Teman angkatan Teknik Elektro, Teman KKN,dan Teman Teman UII yang telah mendukung Penulis dalam proses tugas akhir ini.

Akhir Kata, Penulis menyadari jika Laporan skripsi ini belum sempurna sebagaimana semestinya. Semoga skripsi ini menjadi masukan pada Pembaca dan Penulis mohon kritik serta saran agar ke depannya bisa lebih baik.

Wassalamu 'alaikumwarahmatullahiwabarokatuh.

Yogyakarta, 23 Agustus 2018



Novita Desiwantiyani

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

No	Singkatan	Arti Lambang / besaran dan Satuan
1	DC	<i>Direct Current</i>
2	AC	<i>Alternating Current</i>
3	PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
4	FET	<i>Field Effect Transistor</i>
5	FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
6	kHz	<i>Kilo Hertz</i>
7	IC	<i>Integrated Circuit</i>
8	THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
7	CT	<i>Center Tap</i>
8	ms	Milidetik
9	DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
10	m_f	Rasio Modulasi Frekuensi
11	m_a	Rasio Modulasi Amplitudo
12	I_{rms}	<i>Arus Root Mean Square</i>
13	MOSFET	<i>Metal Oxide Semi Conductor FET</i>
14	s	Detik
15	v	<i>Volt</i>
16	SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>

ABSTRAK

Inverter adalah piranti yang berfungsi untuk mengubah tegangan *input* DC menjadi *output* AC. Salah satu teknik mengoptimalkan *output* inverter adalah PWM. Dalam Tugas Akhir ini, dirancang sebuah Inverter PWM satu fasa dengan pensaklaran SPWM bipolar. Inverter ini mempunyai spesifikasi *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*. Parameter untuk mengetahui kualitas *output* inverter yaitu dengan menentukan nilai m_f . m_f adalah Rasio Modulasi Frekuensi, artinya perbandingan antara frekuensi referensi dengan frekuensi *carrier*. Melalui sampling SPWM *bipolar switching*, diketahui pengaruh variasi m_f terhadap *output* inverter. Desain Inverter PWM menggunakan komponen MOSFET IRF640N, *gate driver* 4N25M, transistor NPN 2N3904 dan PNP 2N3906, LM2575, trafo CT 3 A. Pemicu sinyal SPWM menggunakan program Arduino R3 Uno. Pengukuran *output* inverter menghasilkan tegangan 25,99 VAC dengan variasi nilai m_f 18 dan m_f 36. Pengaruh variasi m_f terhadap *output* yaitu gelombang semakin rapat, frekuensi *carrier* semakin besar. Dari sisi penampilan gelombang, mengindikasikan harmonik pada variasi m_f tersebut lebih bagus, sehingga kualitas inverter semakin baik. Pengujian terhadap beban setelah ditambah trafo, menghasilkan *output* tegangan tegangan 161 VAC, arus 0,10 A, daya 24 W, efisiensi 81%. Target rancang bangun inverter yang dilakukan, terbukti dengan spesifikasi alat.

Kata Kunci : SPWM, PWM, Inverter, *H-Bridge*, *bipolar switching*, m_f .

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 Tinjauan Teori Mengenai Inverter PWM	6
2.2.2 Regulator Tegangan.....	6
2.2.3 <i>Gate Driver</i>	6
2.2.4 MOSFET.....	7
2.2.5 Pensaklaran Bipolar	7
2.2.6 Rasio Modulasi Frekuensi	8
2.2.7 <i>H-Bridge</i>	8

2.2.8 Deret <i>Fourier</i>	9
BAB 3 METODOLOGI	12
3.1 Alat dan Bahan	12
3.2 Alur Penelitian	12
3.3 Desain Inverter	14
3.3.1 Rangkaian Regulator Tegangan	14
3.3.2 Rangkaian Penguat	15
3.3.3 Rangkaian <i>H-Bridge</i>	16
3.4 Hasil Simulasi <i>Software Eagle</i>	16
3.5 Pengujian Inverter	17
3.6 Cara Analisa	18
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Hasil <i>output</i> Inverter <i>H-Bridge</i>	19
4.2 Hasil <i>output</i> Inverter <i>H-Bridge</i> dengan <i>Duty cycle</i> 30%	19
4.3 Hasil <i>output</i> Inverter PWM dengan <i>Duty cycle</i> 75%	20
4.4 Hasil Pembuktian Beban Lampu 25 W	21
4.5 Hasil Gelombang dengan beban Lampu	21
4.6 Hasil dengan Rasio Modulasi Frekuensi 18	23
4.7 Hasil dengan Rasio Modulasi Frekuensi 36	24
4.8 Analisa Teoritis Sinyal <i>Output</i>	27
4.9 Analisa Teoritis Komponen Harmonik Sinyal <i>Output</i>	27
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	29
5.1 Kesimpulan	29
5.2 Saran	29
DAFTAR PUSTAKA	30
LAMPIRAN	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pensaklaran Bipolar SPWM [7].	4
Gambar 2.2 Sinyal PWM dengan <i>duty cycle</i> 50%	5
Gambar 2.3 Sinyal PWM dengan <i>duty cycle</i> 30%	6
Gambar 2.4 Rangkaian <i>H-Bridge</i>	8
Gambar 2.5 Bentuk <i>output</i> gelombang Inverter <i>H-Bridge</i>	9
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	12
Gambar 3.2 Blok Diagram Alat	14
Gambar 3.3 Regulator Tegangan	14
Gambar 3.4 Penguat sinyal.	15
Gambar 3.5 <i>H-Bridge</i> dengan 4 MOSFET	16
Gambar 3.6 Simulasi desain inverter	16
Gambar 3.7 Hasil gelombang <i>output</i> inverter 25,99 V	17
Gambar 4.1 <i>output</i> inverter dengan <i>input</i> 30 VDC	19
Gambar 4.2 <i>output</i> PWM dengan <i>Duty cycle</i> 30%	20
Gambar 4.3 <i>output</i> PWM dengan <i>Duty cycle</i> 75%	20
Gambar 4.4 Hasil pembuktian inverter dengan beban	21
Gambar 4.5 <i>output</i> beban 25 W	23
Gambar 4.6 Hasil $mf = 18$	24
Gambar 4.7 Hasil $mf = 36$	25

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komponen Rancang Bangun Inverter SPWM	11
Tabel 4.1 Perbandingan orde harmonik pada $mf = 18$ dan $mf = 36$	26
Tabel 4.2 Tabel Komponen Harmonik	28

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem Tenaga Listrik telah mengalami kemajuan yang sangat pesat. Dalam perkembangannya, setiap orang dimudahkan untuk melakukan pekerjaan dibidang elektronika. Dalam dunia Listrik, dihasilkan alat – alat elektronika yang bermanfaat untuk kebutuhan di zaman sekarang. Alat elektronika yang berguna dalam kehidupan sehari hari yaitu inverter. Inverter adalah perangkat elektronika yang mengubah tegangan *input* DC menjadi tegangan *output* AC, menggunakan pensaklaran dengan frekuensi tertentu. Alat ini diperlukan, ketika dalam suatu daerah mengalami pemadaman Listrik. Dengan adanya inverter, Pengguna bisa mendapatkan energi Listrik melalui sumber DC (arus searah), sehingga bisa menyalakan Lampu sebagai sumber penerangan sementara.

Inverter mempunyai tiga jenis *output* gelombang yaitu *square wave*, *modified sine wave*, dan *pure sine wave* [1]. Dalam *output* sinyal inverter, terdapat distorsi harmonisa yang besar. Hal ini disebabkan karena pengontrolan inverter yang kurang baik. Cara mengurangi harmonisa pada Inverter, dengan teknik *Pulse Width Modulation*. Teknik PWM dilakukan dengan mengatur besar kecilnya lebar gelombang, melalui nilai frekuensi, dan Amplitudo yang tetap. PWM berfungsi mengatur sumber tegangan yang konstan, sebagai regulator tegangan, mendapatkan tegangan keluaran yang berbeda, dan mengontrol daya terhadap beban. Penyaklaran PWM berupa memanipulasi sinyal keluaran pada keadaan *on* dan *off*. Penyaklaran PWM yang di gunakan yaitu *bipolar switching*. *Bipolar switching* adalah metode pensaklaran saat keadaan lebar pulsa mengalami tegangan positif dan negatif [2].

Pada skripsi ini, Penulis akan membuat Inverter gelombang kotak tipe *H-Bridge* satu fasa. Inverter tersebut, dikombinasikan dengan pensaklaran PWM melalui program di Arduino. Pensaklaran PWM dibuat dengan metode *bipolar switching*. Hasil Inverter PWM divariasikan dengan *duty cycle* sehingga menjadi SPWM. *H-bridge* adalah jembatan penuh, sehingga *output* dari inverter tersebut adalah *square wave*. Prinsip kerja dari rangkaian *H-Bridge* yaitu empat saklar yang bekerja secara bersilangan ketika dialiri oleh arus. Cara kerja bersilangan yang dimaksud, ketika ada dua saklar berlawanan bersifat *on*, dan dua saklar berlawanan bersifat *off*. Arus bekerja bolak balik melewati empat saklar hingga menimbulkan tegangan *output* (AC) bolak balik.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana membuat desain Inverter PWM *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*?
2. Bagaimana hasil pengujian inverter dengan beban resistif?
3. Bagaimana pengaruh variasi Rasio Modulasi Frekuensi terhadap kualitas *output* dari inverter?

1.3 Batasan Masalah

1. Inverter yang di rancang yaitu *H-Bridge*, dengan pembuktian tegangan *input* 30 VDC.
2. Inverter mempunyai spesifikasi *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*.
3. Cara kerja inverter dikendalikan melalui arduino R3 Uno dengan teknik PWM bipolar. variasi m_f menggunakan SPWM *bipolar switching* yaitu *duty cycle* berbeda beda.
4. Pengujian inverter menggunakan lampu pijar daya 25 W dengan trafo CT 3 A.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mendesain *hardware* Inverter PWM *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*.
2. Menguji hasil *output* inverter dengan beban resistif.
3. Mengetahui pengaruh Rasio Modulasi Frekuensi terhadap *output* inverter dengan SPWM *bipolar switching*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari Penelitian ini adalah:

1. Mahasiswa dapat mendesain Inverter PWM *H-Bridge* satu fasa dengan spesifikasi yang telah ditentukan dan dapat mengetahui cara kerja inverter tersebut.
2. Mahasiswa memahami Pemograman pada Arduino melalui pembuatan program PWM dan SPWM *bipolar switching* serta membuktikan hasil rancangan piranti dengan beban resistif.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Studi Literatur berikut terdiri dari beberapa jurnal yang membahas inverter. Terdapat tiga jurnal yang telah dibaca. Jurnal pertama ditulis oleh Turahyo dan Novirianto [3]. Jurnal tersebut menunjukkan bahwa Peneliti mendesain pembangkitan sinyal segitiga berupa gelombang sinus dan gergaji. Desain yang dibuat menggunakan metode *look up table*. Dari metode itu, diketahui perbandingan antara kedua gelombang. Peneliti tersebut merancang Inverter *Push Pull* 12 VDC menjadi 220 VAC, menggunakan IC TL494. Prosesnya, membuat rangkaian dan menentukan komponen. Komponen yang digunakan berupa transistor jenis NPN BD139 dan jenis PNP BD140, dua MOSFET IRF3205, dan resistor. IC TL494 berfungsi untuk menghasilkan pulsa, sehingga memicu *gate* pada MOSFET. Analisanya melakukan uji coba sepuluh kali. Setelah diuji, didapatkan hasil perbandingan pengaruh frekuensi terhadap kapasitor. Besarnya nilai kapasitor akan mempengaruhi nilai hasil frekuensi.

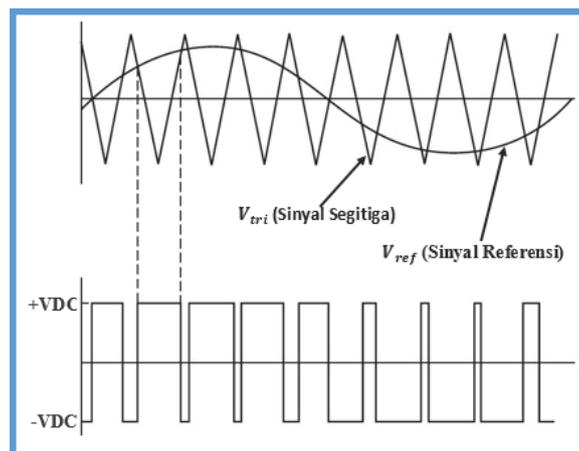
Jurnal kedua ditulis oleh Alam dan Panggabean [4]. Jurnal berikut membahas mengenai rancang bangun Inverter satu fasa dengan frekuensi 50 Hz. Inverter tersebut diimplementasi menggunakan PWM dengan proses *switching*. Dalam proses perancangan, digunakan *gate driver*, *oscillator*, Inverter *full Bridge*, *low pass filter*, dan DC *Booster*. Inverter didesain untuk tegangan *input* 12 – 42 VDC dengan konversi 20 VAC. *Oscillator* digunakan untuk mendapatkan sinyal PWM dengan frekuensi yang ditentukan. IC pada *gate driver* mempunyai keunggulan, di mana mampu membuat waktu tunda ketika perubahan dua sinyal terjadi. Waktu tunda dibutuhkan karena dalam proses *switching* terjadi perpindahan kondisi *high* ke *low*. Dengan adanya waktu tunda, maka dapat menghindari saklar yang terbuka di saat kondisi bersamaan. Ketika Inverter bekerja dengan baik, bentuk sinyal akan sesuai dengan hasil *switching*. Hasil dari jurnal ini adalah gelombang PWM di sertai *ripple*. *Ripple* terjadi karena pensaklaran FET.

Jurnal terakhir ditulis oleh Ahmed dan Sheir [5]. Literatur mereka berisi tentang cara termudah menghasilkan tegangan AC. Tegangan AC Inverter diperoleh dengan cara mengatur kecepatan sudut pada saklar ketika arus mengalir. Setelah diatur akan dihasilkan *output* tegangan level positif dan negatif. Tegangan yang dihasilkan berulang – ulang sesuai dengan frekuensi yang telah ditetapkan. Melalui menambah level tegangan, diperoleh gelombang kotak yang mendekati *sinusoidal*. Pengaturan tegangan bisa dilakukan dengan teknik PWM. Untuk mengatur harmonisa, dilakukan dengan filter dan teknik pensaklaran.

2.2 Tinjauan Teori

PWM berfungsi untuk mengatur jumlah daya yang disuplai ke beban tanpa adanya rugi – rugi. Sinyal PWM terbagi menjadi dua macam yaitu NPWM dan UPWM. NPWM adalah hasil pembangkitan sinyal PWM dalam bentuk sampling natural. UPWM adalah hasil pembangkitan sinyal menggunakan metode *uniform* sampling [6]. PWM dibangkitkan secara digital. Proses pembangkitan sinyalnya dengan Arduino dan Mikrokontroler secara diskrit. Jika sinyal diatur *high / on*, maka sinyal dikirim dari arduino menuju alat sehingga sinyal referensi lebih besar dari sinyal gergaji. Jika sinyal diatur *low / off*, maka sinyal gergaji lebih besar dari sinyal referensi.

PWM adalah modulasi lebar pulsa. Proses pensaklaran SPWM *bipolar switching* menggunakan dua buah sinyal yakni sinyal segitiga dan sinyal sinus seperti pada Gambar 2.1. Cara modulasinya yaitu dengan perbandingan sinyal *carrier* dengan sinyal referensi. Prinsip *bipolar switching* adalah ketika amplitudo sinyal referensi lebih besar dari sinyal *carrier* maka hasilnya *high* atau *on*. Kemudian, ketika sinyal referensi lebih kecil dari sinyal *carrier* maka hasilnya *off* atau *low*. Perbandingan dari kedua sinyal tersebut, akan didapatkan nilai *duty cycle*.



Gambar 2.1 Pensaklaran Bipolar SPWM [7].

Persamaan 2.1 menunjukkan bahwa T_{on} adalah lamanya waktu keluaran sinyal dalam keadaan *on / high*. T_{off} adalah lamanya waktu keluaran sinyal pada keadaan *off / low*. Jumlah lamanya waktu *output* T_{on} dan T_{off} akan jadi T_{total} atau disebut 1 periode gelombang.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (2.1)$$

Di mana,

$$T_{on} = \text{waktu pulsa } high \text{ (ms)}$$

$$T_{off} = \text{waktu pulsa } low \text{ (ms)}$$

$$T_{total} = \text{waktu dalam satu 1 periode gelombang (ms)}$$

Total dari kedua sinyal menentukan besar *duty cycle* pada persamaan 2.2. *Duty cycle* adalah perbandingan terhadap waktu saat gelombang kondisi *on / high* dibagi dengan jumlah waktu gelombang 1 periode.

$$Duty\ Cycle = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Di mana,

T_{on} = waktu pulsa *high* (ms)

T_{off} = waktu pulsa *low* (ms)

Duty Cycle = lamanya pulsa *high* dalam satu periode (%)

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \quad (2.3)$$

Di mana,

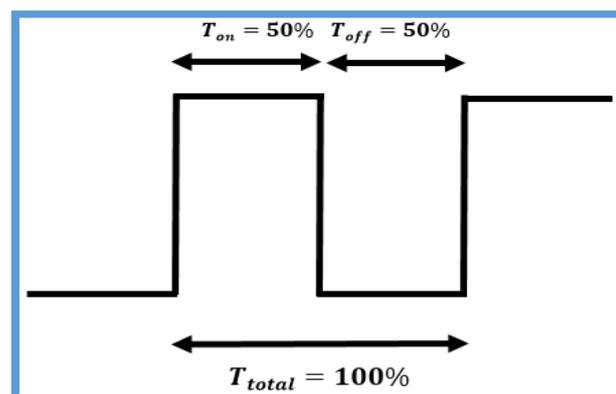
T_{on} = waktu pulsa *high* (ms)

T_{total} = waktu dalam satu 1 periode gelombang (ms)

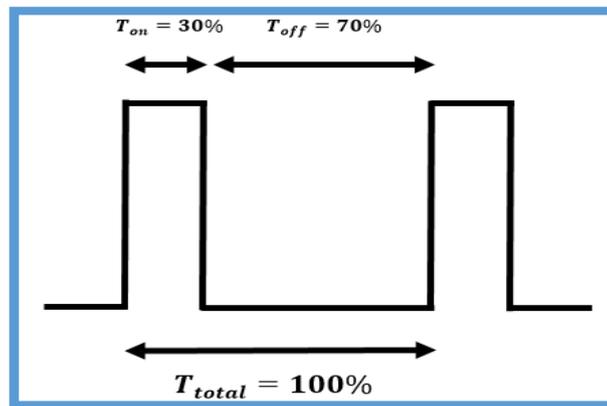
V_{out} = tegangan *output* (V)

V_{in} = tegangan *input* (V)

Teknik PWM dihasilkan dengan mengubah perbandingan antara lebar pulsa positif ke lebar pulsa negatif. Proses perbandingan sinyal tidak merubah frekuensinya. Total 1 periode / T pada pulsa PWM tetap [8]. Berikut adalah contoh gambar sinyal PWM yang menggunakan perbandingan T_{on} dan T_{total} yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Sinyal PWM dengan *duty cycle* 50%



Gambar 2.3 Sinyal PWM dengan *duty cycle* 30%

2.2.1 Tinjauan Teori Mengenai Inverter PWM

Pada *output* Inverter, total harmonik dapat dikurangi dengan metode SPWM [9]. Harmonik pada Inverter yang tidak di filter, terdapat cacat gelombang frekuensi yang tinggi. Namun, tidak berlaku pada *output* gelombang kotak. PWM menawarkan solusi untuk mengontrol tegangan *output* dan amplitudo. Proses kontrolnya, melalui modulasi bentuk gelombang untuk mengurangi harmonik. Pada metode *bipolar switching*, bentuk pengendaliannya memerlukan sinyal pembawa atau gelombang segitiga.

2.2.2 Regulator Tegangan

Dalam mendesain Inverter, diperlukan penstabil tegangan untuk mendapatkan variasi *input* dan menstabilkan *output*. Penstabil tegangan yang dimaksud yaitu regulator tegangan seperti pada Tabel 2.1. Komponen ini berfungsi untuk memberi stabilitas pada masukan *power supply*. Jika tidak terpasang regulator tegangan, maka *output* tegangan DC dari penyearah cenderung berubah – ubah saat di proses. Penyebab tidak stabilnya *power supply* karena *input* tegangan AC dari PLN dan variasi beban. Desain regulator tegangan membutuhkan komponen tambahan seperti IC, dioda, kapasitor, dan induktor.

2.2.3 Gate Driver

Pemicu sinyal pada inverter berupa *gate driver*. Salah satu komponen yang bertindak sebagai *gate driver* adalah *optocoupler*. Komponen ini disebut juga sebagai *optotransistor*. *Optocoupler* adalah komponen elektronika yang bekerja berdasarkan penghubung cahaya optik [10] seperti yang terdapat pada Tabel 2.1. Komponen ini menggunakan sinar pemicu *high / low* dan pemicu *on / off*. *Opto* adalah optik, sedangkan *coupler* adalah pemicu. *Optocoupler*

mempunyai dua sensor. Sensornya terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. *Transmitter* berfungsi sebagai pengirim cahaya sinyal optik. *Receiver* berfungsi penerima cahaya sinyal optik.

2.2.4 MOSFET

Selain menggunakan pemicu sinyal, diperlukan saklar dalam merancang inverter. Komponen yang berfungsi sebagai saklar yaitu MOSFET seperti yang di tunjukkan pada Tabel 2.1. MOSFET disebut sebagai *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*. MOSFET adalah transistor efek medan berupa perangkat semikonduktor yang mempunyai impedansi masukan tinggi. MOSFET bekerja dengan cara mengaktifkan buka tutup saklar *on* dan *off*. MOSFET mempunyai 3 gerbang terminal yaitu *source* (S), *gate* (G), dan *drain* (D). Melalui gerbang tersebut, arus listrik masuk melewati *source* dan keluar melalui *drain*. *Gate* berfungsi untuk mengatur lebar saluran yang dikendalikan oleh tegangan elektroda.

2.2.5 Pensaklaran Bipolar

Bentuk pensaklaran yang sering digunakan pada inverter yaitu rangkaian *H-Bridge*. Dalam kata lain, sering disebut dengan *H-Bridge bipolar*. Saklar 1,4 dan Saklar 2,3 bekerja bersama-sama melalui metode bipolar. Alasan memilih pensaklaran bipolar, karena total harmonik yang didapat baik. Efisiensi yang dihasilkan tinggi dan penggunaan daya tidak terlalu besar. Persamaan 2.4 dan persamaan 2.5 mengilustrasikan rumus dari modulasi bipolar. Prinsip bipolar yaitu jika nilai sinyal referensi lebih besar dari sinyal *carrier*, maka keluarannya (+VDC). Jika sinyal referensi kurang dari sinyal *carrier*, maka keluarannya (-VDC).

$$V_o = +VDC \text{ untuk } V_{sine} > V_{tri} \quad (2.4)$$

$$V_o = -VDC \text{ untuk } V_{sine} < V_{tri} \quad (2.5)$$

Di mana,

$$V_o = \text{Tegangan input (V)}$$

$$V_{DC} = \text{Tegangan DC (V)}$$

$$V_{sine} = \text{Tegangan Sinyal Pembawa (V)}$$

$$V_{tri} = \text{Tegangan Sinyal Carrier (V)}$$

2.2.6 Rasio Modulasi Frekuensi

Rasio Modulasi Frekuensi atau m_f adalah perbandingan dari frekuensi sinyal segitiga dengan frekuensi sinyal pembawa [11]. Deret *fourier* pada *output* PWM, mempunyai nilai tegangan frekuensi dasar yang sama dengan frekuensi pada sinyal. Frekuensi harmonisa terletak pada kelipatan frekuensi *switching*. Harmonik yang terdapat pada gelombang, mempunyai nilai yang sangat besar dari nilai sebenarnya. Frekuensi tinggi menjadi penyebab adanya harmonik. Untuk mengetahui nilai dari Rasio Modulasi Frekuensi, ditunjukkan pada persamaan 2.6.

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sine}} \quad (2.6)$$

Di mana,

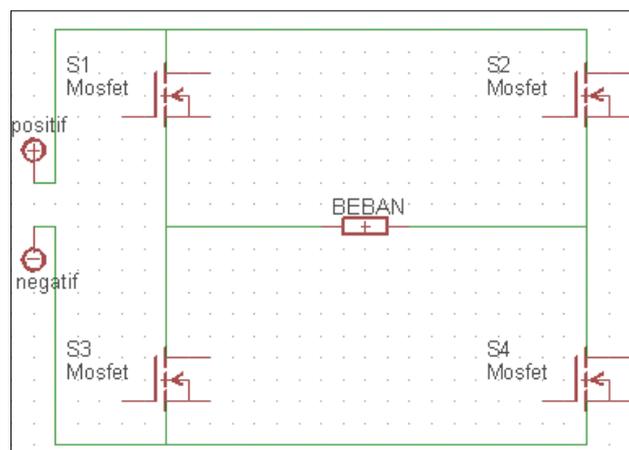
$$f_{tri} = f_{carrier} = \text{Frekuensi sinyal } carrier / \text{ segitiga (Hz)}$$

$$f_{sine} = F_{reference} = \text{Frekuensi sinyal pembawa (Hz)}$$

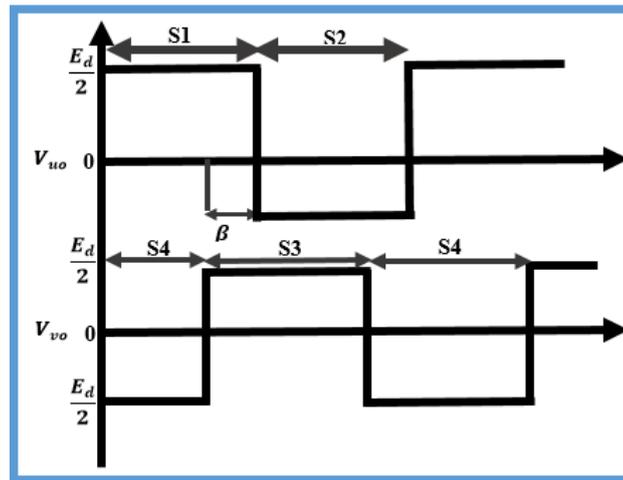
$$m_f = \text{Rasio Modulasi Frekuensi}$$

2.2.7 H-Bridge

Inverter *H-Bridge* adalah peralatan elektronika yang terdiri dari empat buah saklar seperti pada Gambar 2.4. Tiap saklar terhubung melalui jembatan. Jembatan tersebut dialiri oleh arus sumber tegangan. *Output* inverter jenis ini berupa gelombang kotak yang terdapat pada Gambar 2.5. Proses kontrol pada empat saklar menggunakan mikrokontroler jenis atmega. Pada bidang elektronika, bentuk *H-Bridge* dapat diperluas dengan penambahan rangkaian. Penambahan rangkaian tersebut akan menghasilkan tegangan *output* tambahan. Pada *H-Bridge* satu fasa mempunyai tegangan *output* yang terdiri dari +VDC, -VDC, dan nol [12].



Gambar 2.4 Rangkaian *H-Bridge*



Gambar 2.5 Bentuk *output* gelombang Inverter *H-Bridge*

2.2.8 Deret *Fourier*

Persamaan 2.7 menunjukkan rumus untuk mencari tegangan *output* pada *deret fourier* [13]. Untuk mendapat nilai *deret fourier*, maka ditentukan dengan memeriksa deret pulsa dan gelombang segitiga. Tegangan *output* tersebut dikombinasikan melalui gelombang referensi. *Output* PWM berupa tegangan yang menghasilkan bilangan ganjil pada nilai m_f .

$$V_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t) \quad (2.7)$$

Di mana,

V_o = tegangan *output* (V)

V_n = tegangan orde harmonik (V)

n = orde harmonik ($n=3,5,7..$)

Harmonik adalah komponen sinus yang terdapat pada satu periode gelombang. Dalam periode gelombang, sinus muncul pada frekuensi yang sama [14]. Frekuensi tersebut merupakan kelipatan bulat dari gelombang fundamental. Persamaan matematik menunjukkan harmonik yang terdapat pada inverter. Persamaannya berupa perhitungan deret *fourier* dengan analisa gelombang. Perbandingan nilai harmonisa dinyatakan dalam bentuk persen atau disebut THD. *Total Harmonic Distortion* adalah perbandingan nilai komponen harmonik dengan nilai komponen fundamental. THD bertujuan untuk mengetahui penyimpangan hasil gelombang yang mengandung harmonik pada gelombang satu periode. *Output* Inverter, ditentukan dengan kemiripan tingkatan pada sinyal sinus murni. Persamaan 2.8 menyatakan nilai *Total Harmonic Distortion* untuk gelombang yang tidak sinus [15].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (2.8)$$

Di mana,

V_{rms} = Tegangan *root mean square* (V)

V_1 = Tegangan (V)

V_n = Tegangan harmonik ke-n (V)

THD = *Total Harmonic Distortion* (%)

Rumus THD terhadap arus, sama dengan rumus THD terhadap tegangan. Cara perhitungannya dengan mengganti nilai tegangan menjadi nilai arus. Persamaan 2.9 merupakan rumus untuk mencari nilai komponen harmonik tegangan.

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \quad (2.9)$$

Di mana,

V_n = Komponen harmonik tegangan ke-n (V)

V_{dc} = Tegangan DC (V)

n = orde harmonik (n=3,5,7..)

Persamaan 3.1 menentukan nilai komponen harmonik arus. Nilai ini didapat dengan membandingkan komponen harmonik tegangan dan nilai impedansi harmonik.

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (3.1)$$

Di mana,

V_n = Komponen harmonik tegangan ke-n (V)

Z_n = Komponen Impedansi harmonik ke-n (Ω)

I_n = Komponen harmonik arus ke-n (A)

Untuk mengetahui daya harmonik, digunakan rumus daya terhadap deret *fourier*. Persamaan 3.2 menunjukkan rumus untuk mencari daya pada tiap komponen harmonik.

$$P_n = I_n^2 \times R = \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2 \times R \quad (3.2)$$

Di mana,

P_n = Daya harmonik ke-n (W)

I_n = Komponen harmonik arus ke-n (A)

R = Beban (Ω)

Tabel 2.1 Komponen Rancang Bangun Inverter SPWM

No	Nama Komponen	Fungsi
1	Arduino	Membangkitkan sinyal <i>High</i> dan <i>Low</i> pada PWM, sebagai Pengirim Sinyal menuju <i>Hardware</i> agar dapat menampilkan gelombang ke osiloskop.
2	MOSFET	Transistor sebagai penguat, sebagai saklar elektronik, menghasilkan tegangan tinggi pada <i>switching power supply</i> , bertindak sebagai saklar <i>on</i> dan <i>off</i> pada Inverter.
3	IC <i>photodiode optocoupler</i>	Fungsinya yang terbagi secara dua jenis yaitu secara linear dan secara digital. Salah satunya jika secara linear yaitu penguat daya, secara digital sebagai gerbang logika, sebagai <i>Gate driver</i> pada Inverter PWM.
4	RLC	Sebagai tahanan, resistansi, induktansi dan kapasitansi yang di gunakan pada rangkaian untuk aplikasi ke <i>hardware</i> .
5	Regulator Tegangan	Penyedia tegangan DC tetap dengan level nilai tegangan, penurun tegangan untuk tegangan pada 5 V Arduino, penstabil tegangan ketika di pengaruhi oleh perubahan tegangan masukan
6	Dioda	Penghantar arus listrik pada saat bias maju dan sebagai penghambat pada arus listrik pada saat bias mundur.

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

Dalam merancang Inverter ini terdiri dari alat, bahan, serta komponen yang akan dirinci sebagai berikut.

- Alat dan Bahan,

Arduino Uno R3, Kabel penghubung, penjepit buaya, *power supply* 30 VDC, osiloskop rigol, multimeter digital, solder, isi timah solder, obeng min (-), *wattmeter*, papan pcb, 1 buah Lampu.

- Komponen,

IC LM2575, Kapasitor 470 μf dan 100 μf , Induktor SMD 331, dioda zener, MOSFET IRF640N (4 buah), Transistor NPN 2N3904 (4 buah), Transistor PNP 2N3906 (4 buah), IC 4N25M (4 buah), Resistor 330 Ω , 5,6 k Ω , 1,2 k Ω (masing masing 4 buah), dan trafo CT 3 A.

3.2 Alur Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Dari Gambar 3.1 dapat dilihat alur perancangan Inverter yang dilakukan Penulis melalui beberapa tahapan yaitu:

1. Mendesain dan membuat *hardware* Inverter.

Inverter yang akan didesain spesifikasinya *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*. Prosesnya mendesain rangkaian dengan *software* eagle. Desain dicetak pada papan pcb, kemudian di solder.

2. Program PWM dan *setting* frekuensi.

Program PWM dirancang dengan *software* Arduino IDE seperti pada Lampiran 1. Frekuensi 50 Hz diatur melalui program. Pemograman nilai PWM menggunakan fungsi *digitalwrite*. Fungsi tersebut mengatur saklar dengan memberi nilai *high* atau *low* ke pin digital.

3. Pengujian inverter ke Osiloskop.

Arduino yang telah diunggah program, dihubungkan ke inverter. Kemudian inverter diberi *input* 30 VDC. Hasil dari gelombang diuji ke osiloskop. Kemudian, diukur tegangan *input* dan *output* alat dengan multimeter digital.

4. Pengujian terhadap beban.

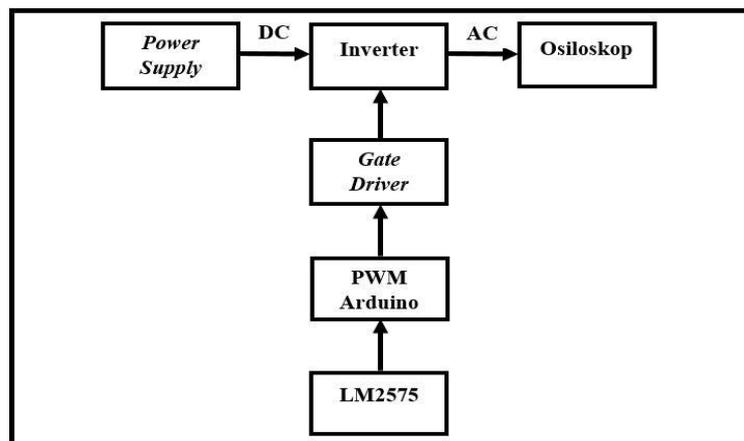
Langkah selanjutnya, menguji piranti ke beban. Pengujian dilakukan saat inverter telah dinaikkan tegangannya oleh trafo. Inverter diuji pada lampu pijar 25 W.

5. Variasi *duty cycle* dengan IDE Arduino

Variasi *duty cycle* berdasarkan metode SPWM. metodenya *bipolar switching*. Pensaklaran bipolar merupakan teknik mengubah sinyal pulsa berbeda beda dalam satu periode. Variasi dengan sampling 9 dan 18 sesuai program pada Lampiran 2. Pengujian variasi *duty cycle* diketahui hasil gelombangnya dengan osiloskop. Hasilnya menentukan nilai m_f .

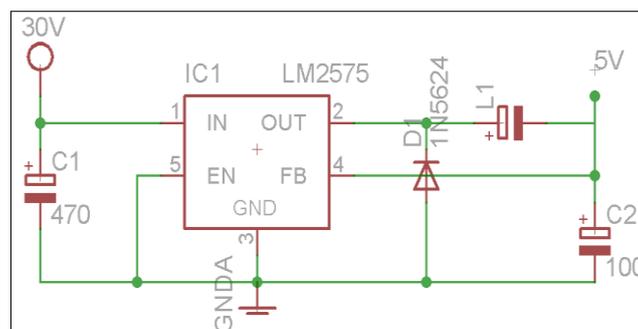
3.3 Desain Inverter

Blok diagram alat ditunjukkan pada Gambar 3.2. Sumber tegangan *input* yang digunakan adalah *power supply* DC 30 V. Saat tegangan *input* diatur pada *power supply*, arus mengalir menuju inverter. Rangkain pada inverter terdiri dari regulator tegangan, rangkaian penguat, dan rangkaian *H-Bridge*. LM2575 mendapat tegangan DC melalui *input power supply*. Pada LM2575 menghasilkan *output* tegangan DC untuk mengaktifkan tegangan pada arduino. PWM kontrol arduino aktif. PWM kontrol mengirimkan sinyal *high* dan *low* berdasarkan program pada lampiran 1. Sinyal tersebut dikirim ke *gate driver* IC 4N25M sebagai pembangkit pulsa. Arus yang mengalir pada inverter, dibangkitkan kontrol pulsanya melalui *gate driver*. IC 4N25M mendapat penguatan sinyal melalui transistor bipolar NPN N3904 dan PNP N3906. Arus yang melewati jembatan transistor bipolar menuju ke arah MOSFET sesuai dengan prinsip kerja rangkaian *H-Bridge*. MOSFET mengaktifkan saklar elektronik untuk membuka dan menutup saklar sesuai dengan kontrol PWM yang diatur. Arah aliran MOSFET yang bolak balik menimbulkan tegangan AC. Tegangan AC pada inverter akan terbaca *output* gelombangnya melalui osiloskop. Proses pengukuran tegangan *input* dan *output* dengan menggunakan multimeter digital.



Gambar 3.2 Blok Diagram Alat

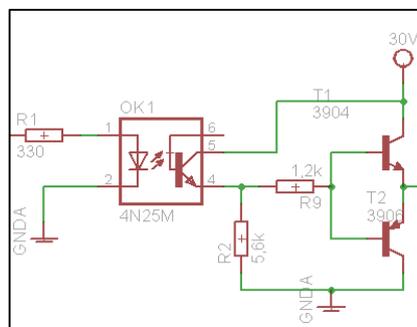
3.3.1 Rangkaian Regulator Tegangan



Gambar 3.3 Regulator Tegangan

Dalam membuat kisaran tegangan *input* 15 – 30 V, diperlukan regulator tegangan. Fungsinya sebagai penstabil tegangan tetap, *input* sesuai rating, dan menurunkan tegangan DC sebagai *input* tegangan kerja pada Arduino. Regulator tegangan yang dipilih Penulis adalah LM2575, seperti pada Gambar 3.3. Regulator tegangan tersebut dikemas dalam bentuk sirkuit terintegrasi (IC). Alasan memilih komponen tersebut, karena bisa dimasukkan tegangan 15V – 60 V, dapat menggerakkan beban hingga 1 A, tidak mudah panas. Sehingga sesuai dengan desain yang akan dirancang. Seri regulator ini masuk ditipe *fixed* (*output* tetap), maka sesuai data sheet diperlukan komponen tambahan. Komponen berupa dua kapasitor polar 470 μf dan 100 μf , satu diode zener, dan induktor 331 μH . Komponen tambahan yang Penulis gunakan hanya yang terdapat di pasaran, namun mendekati spesifikasi komponen pada data sheetnya [16].

3.3.2 Rangkaian Penguat



Gambar 3.4 Penguat sinyal

Penulis menggunakan transistor bipolar seperti pada Gambar 3.4. Transistor yang digunakan dengan tipe NPN 2N3904 dan tipe PNP 2N3906. Alasan digunakan transistor yaitu sebagai penguat tegangan, membangkitkan frekuensi, dan jembatan saklar. Penambahan resistor diperlukan untuk menahan atau membatasi arus. Transistor ini mempunyai tegangan yang mengalir pada *emitter* dan *base* sebesar 40 V. Arus maksimum pada kolektor 200 ma, dengan frekuensi 200 MHz sebagai penguat. maka, komponen tersebut cocok untuk inverter yang akan dirancang.

Pemilihan komponen berikutnya yaitu *gate driver*. *Gate driver* diperlukan sebagai pengendali melalui Arduino, dengan kecepatan pemicu yang cepat. Maka digunakan IC 4N25M. IC tersebut punya kelebihan, yaitu *input* tegangan kecil melalui tegangan kerja Arduino, dan mampu mengendalikan beban dengan tegangan besar. IC ini tidak akan merusak komponen di sekitar atau sistem kontrolnya, jika ada lonjakan listrik. Prinsip kerja 4N25M melalui pemancar cahaya optik. IC 4N25M punya spesifikasi batas *on* 2-5 μs dan batas *off* 300 n_s , tegangan isolasi 2500 V, I_{LED} 15 – 30 ma, dalam *input* tegangan 5 V arduino diperlukan tahanan pembatas. Tahanan tersebut, memakai resistor 330 Ω . IC ini khusus untuk *input* DC dan *output* dengan transistor *base*, sehingga digunakan transistor bipolar.

penghubungnya melalui *input* pin. Pada Arduino terdiri dari 6 pin. Pin 1 terhubung ke tegangan 5 V Arduino. Pin 6 terhubung ke *ground*. Pin 2 dan 5 diseri sehingga menyatakan saklar (Q1,Q4). Pin 3 dan 4 diseri sehingga menyatakan saklar (Q2,Q3). Rangkaian tersebut bekerja dengan cara bersilangan. Ketika tegangan *input* DC masuk, arus mengalir melewati regulator tegangan. *Output* regulator tegangan memberi tegangan kerja pada arduino. Arus menuju ke 4N25M dan melewati penguat transistor. Saat MOSFET (Q1,Q4) tertutup, maka arus masuk melewati saklar tersebut. Pada bagian ini MOSFET (Q2,Q3) terbuka. Sebaliknya, saat (Q2,Q3) tertutup dan (Q1,Q4) terbuka, arus mengalir menuju MOSFET (Q2,Q3). Arus yang mengalir akan bolak balik sehingga tegangan *output* berubah menjadi AC.

3.5 Pengujian Inverter

Pengukuran inverter, menghasilkan *input* 30 VDC dan *output* 25,96 VAC. Arus yang mengalir sebesar 0,02 A daya 0,06 W. Untuk menghasilkan *output* tegangan AC 220 V, *output* inverter dihubung dengan trafo *center tap* 3 A. Polaritas trafo dibalik, sehingga bagian sekunder dihubung ke *output* inverter. Maka yang dihubungkan adalah pada titik *center tap* dan titik 25 V. Saat pengukuran bagian primer pada titik 0 V dan 220 V, trafo ini dapat menaikkan tegangan sebesar 220 VAC. Melalui hasil yang diperoleh, validitas spesifikasi terbukti.

Pada saat *output* inverter terhubung dengan trafo, parameter pada *input* DC mengalami peningkatan. Arus DC terukur sebesar 0,15 A dengan daya 4,5 W. Tegangan *input* yang terukur 30 VDC. Pada bagian sekunder, di titik *center tap* dan 25 V mempunyai nilai tegangan yang sama dengan *output* inverter. Tegangan yang terukur yaitu 25,99 V. Daya pada *output* inverter sebesar 40 W. Kapasitas daya pada inverter ini yaitu 30 W. Jika melebihi dari batas tersebut, maka kualitas desain terhadap pembebanan tidak optimal. Kemudian, tegangan kerja dari inverter tidak normal, karena arus maksimal hanya 1 A. Sehingga jika dihubung pada daya diatas batas kapasitas, inverter tidak akan bekerja dengan baik. Dalam hal tersebut, beban tidak akan menyala atau dalam keadaan redup.



Gambar 3.7 Hasil gelombang *output* inverter 25,99 V

Output gelombang inverter pada osiloskop, dapat dilihat secara *offline* dengan *software ultrascope*. *Output* inverter *square wave* ditunjukkan pada Gambar 3.7. Tegangan gelombang pada gambar tersebut adalah 25,99 VAC. *Software* ini menampilkan spektrum frekuensi. Frekuensi 50 Hz dapat dibuktikan melalui hasil gelombang yang terbaca pada Osiloskop dan *software*. Maka spesifikasi frekuensi yang dirancang dapat terbukti. Hasil gelombang dapat dilihat secara *real time* melalui laptop yang tersambung dengan osiloskop. *Software* yang digunakan adalah *ultrasigma*. *Software* ini mampu menampilkan gelombang yang ada di osiloskop secara nyata dan lebih detail. Namun jika untuk *offline*, hanya dapat ditampilkan hasil pada saat terakhir dari gelombang dan FFT yang disimpan. Kedua *software* tersebut terhubung melalui *ip address*.

3.6 Cara Analisa

Untuk mengetahui kinerja sistem, diperlukan parameter sejenis dalam melihat karakteristik *output* inverter. Parameter tersebut dilakukan dengan penentuan analisa. Dari analisa yang dihasilkan, dapat diketahui validitas desain inverter. Melalui analisa tersebut, dapat mencari hasil perhitungan, yang telah ditetapkan berdasarkan teori. Langkah dalam penilaian kinerja inverter terdiri dari

1. Desain yang dibuat telah berfungsi sebagaimana kinerja inverter secara umum. Hal yang dimaksud adalah inverter mampu mengubah tegangan *input* DC menjadi tegangan *output* AC. Inverter mempunyai *output square wave* dibuktikan dengan osiloskop.
2. Inverter mampu menerapkan teknik PWM. Desain berhasil, jika mampu membuktikan parameter *output* dengan *duty cycle* yang diatur pada Arduino. Hasil sinyal dapat dibuktikan melalui gelombang yang terbaca osiloskop.
3. variasi m_f inverter dengan SPWM *bipolar switching*. Caranya dengan menambah *duty cycle* menjadi 9, serta menambah *duty cycle* menjadi 18 dalam satu kondisi. Kemudian menghitung 1 periode dari 1 gelombang kotak pada sampling 9 dan 18. Selain itu, diperoleh nilai frekuensi *carrier* untuk menemukan nilai Rasio Modulasi Frekuensi.
4. Keberhasilan inverter, dilakukan dengan membuktikan sebuah beban. Beban yang diuji adalah lampu pijar 25 W. Dari pengujian, dapat diketahui analisis hasil yang didapatkan.

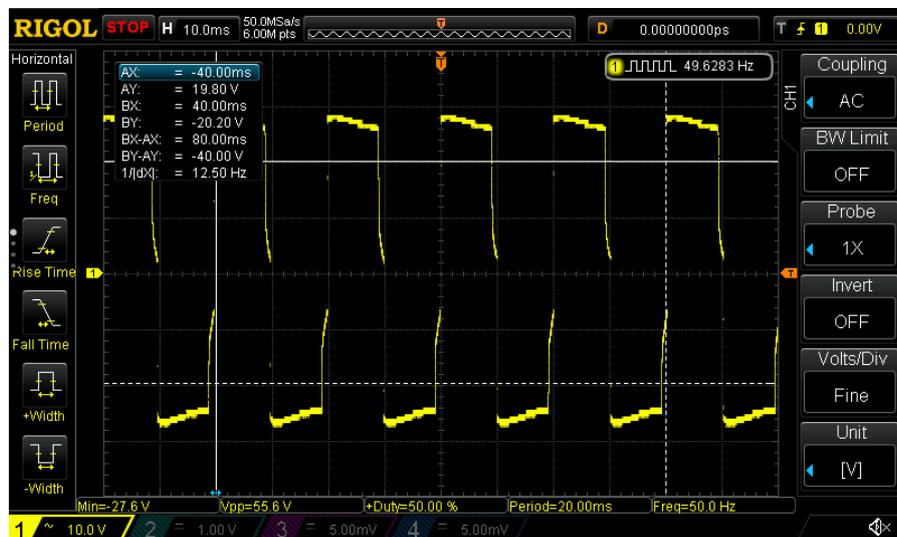
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *output* Inverter *H-Bridge*

Pada hasil berikut, *output* sinyal inverter adalah *square wave*. Maka desain alat yang dirancang telah berhasil, karena rangkaian *H-Bridge* mempunyai *output* berupa gelombang kotak. Tegangan *input* DC yang diatur pada *power supply* adalah 30 VDC. Ketika *input* disambung ke inverter, maka hasilnya yaitu *input* DC 30 V, arus 0,02 A, daya 0,6 W. Pengukuran selanjutnya menggunakan multimeter digital. Pada multimeter, *input* yang terukur adalah 30 VDC. *Output* yang terbaca 25,96 VAC. Dari hasil percobaan, maka inverter telah terbukti mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC.

Hasil frekuensi yang terbaca osiloskop adalah 50 Hz. Nilai periode merupakan setengah dari nilai frekuensi. Periode nya adalah 20 ms. Pengaturan frekuensi pada program Arduino telah terbukti melalui osiloskop seperti pada Gambar 4.1. *Duty cycle* yang digunakan yaitu 50%. Periode 20 ms, nilai T_{on} yang diatur 10 ms dan T_{off} yang diatur 10 ms. Hasil gelombang yang terbaca, memiliki lebar pulsa *high* dan lebar pulsa *low* yang sama.

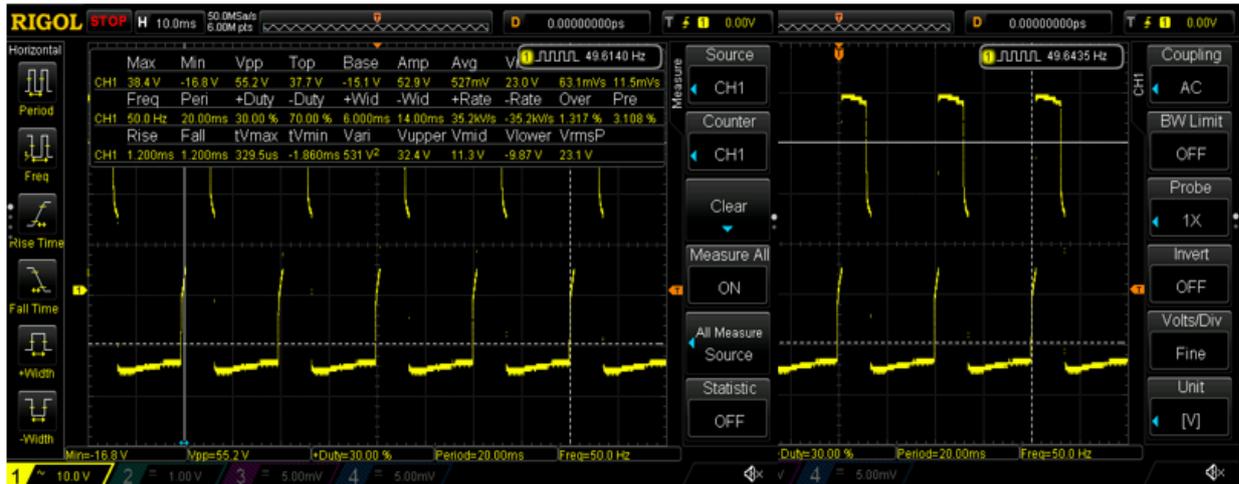


Gambar 4.1 *output* inverter dengan *input* 30 VDC

4.2 Hasil *output* Inverter *H-Bridge* dengan *Duty cycle* 30%

Pengujian kedua mengatur *duty cycle* menjadi 30 %. Frekuensi pada bagian ini tetap 50 Hz dengan periode 20 ms. Hasil sinyal yang terbaca, terjadi perubahan yang signifikan. Lebar pulsa *high* lebih pendek daripada pulsa *low*. Durasi lebar pulsa sinyal *carrier* lebih tinggi dari sinyal referensi. Untuk menghasilkan *duty cycle* 30%, dengan cara menentukan lebar pulsa. Nilai T_{on}

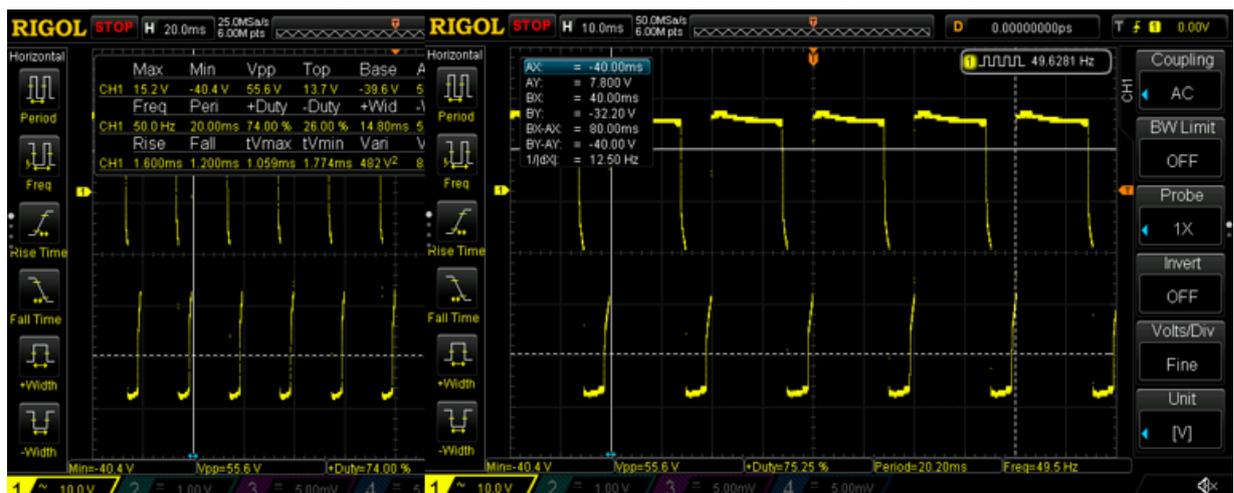
yang diatur 6 ms dan T_{off} yang diatur 14 ms. Sehingga melalui rumus perbandingan waktu *high* dengan waktu total, dihasilkan *duty cycle* 30% seperti pada Gambar 4.2. Perhitungan tersebut yang membuktikan jika lebar pulsa *on* lebih kecil daripada lebar pulsa *off*.



Gambar 4.2 *output* PWM dengan *Duty cycle* 30%

4.3 Hasil *output* Inverter PWM dengan *Duty cycle* 75%

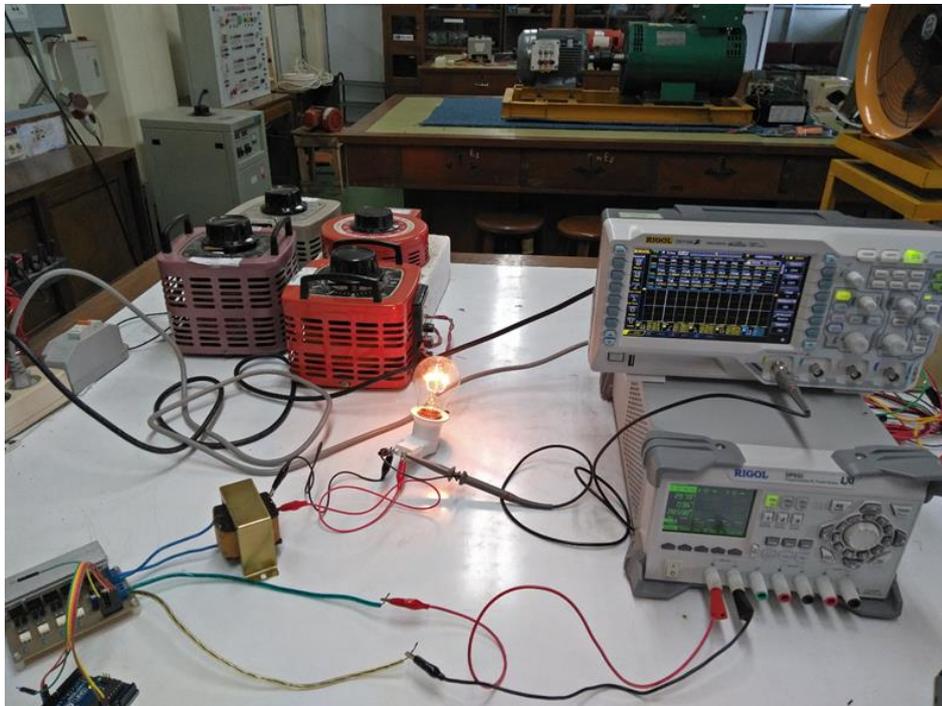
Pengujian ketiga mengatur *duty cycle* menjadi 75%. Frekuensi yang diatur 50 Hz dengan periode 20 ms. Pada gelombang tersebut, lebar pulsa *high* lebih besar daripada lebar pulsa *low* seperti pada Gambar 4.3. Sinyal referensi lebih besar dari sinyal *carrier*. Nilai *duty cycle* 75% diatur melalui perbandingan rumus pada pensaklaran PWM. Nilai T_{on} yang diatur 15 ms dan T_{off} yang diatur 5 ms. Nilai *duty cycle* yang di ubah – ubah, tidak mempengaruhi perubahan frekuensi dan tegangan. Namun, mempengaruhi perubahan lebar pulsa pada gelombang.



Gambar 4.3 *output* PWM dengan *Duty cycle* 75%

4.4 Hasil Pembuktian Beban Lampu 25 W

Pada pengujian keempat, membuktikan inverter dengan beban. Spesifikasi desain yang diinginkan adalah *H-Bridge* 1 fasa, kapasitas *input* 15-30 VDC, tegangan *output* inverter 25,96 VAC, tegangan *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*. Dengan parameter tersebut, Penulis menguji inverter dengan beban lampu pijar 220 VAC daya 25 W. Pengujian dilakukan dengan *input* 30 VDC. Polaritas lampu pijar dihubungkan dengan bagian primer trafo *center tap* pada titik 0 V dan 220 VAC. Melalui Gambar 4.4, dapat ditinjau target dari hasil pencapaian rancang bangun inverter. Inverter tersebut mampu menyalakan lampu 25 W. Dengan pengujian tersebut, tidak terjadi perubahan intensitas cahaya. Tegangan *output* dan *input* pada inverter tetap pada keadaan beban yang disuplai. Parameter hasil pengujian beban terdapat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Hasil pembuktian inverter dengan beban

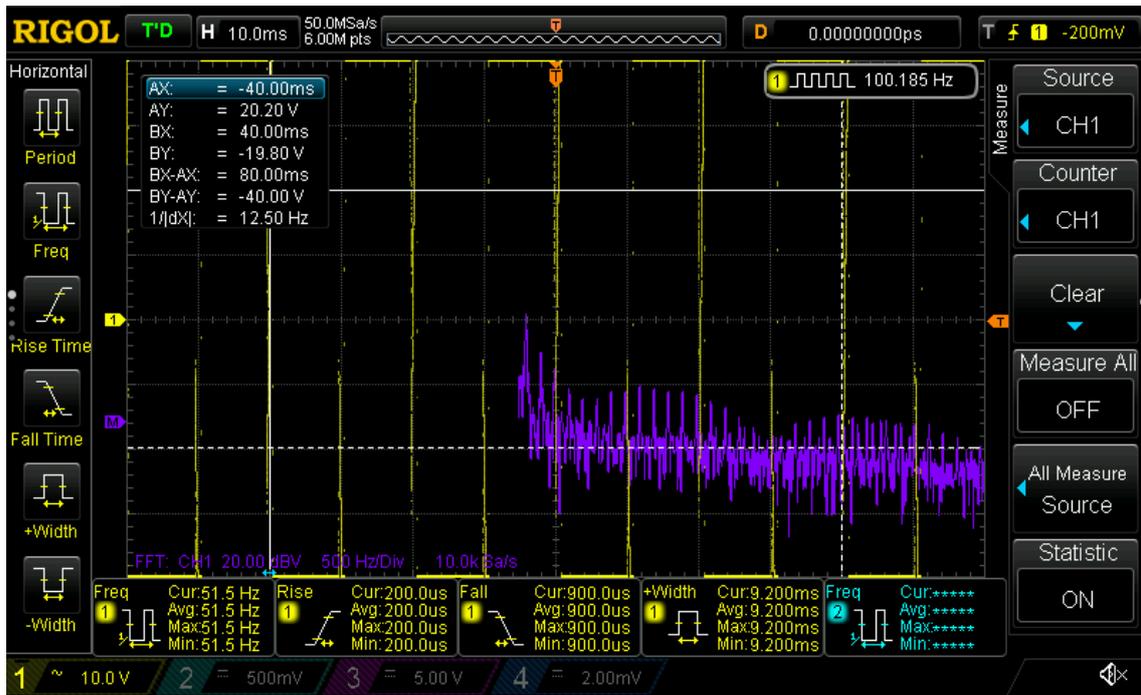
4.5 Hasil Gelombang dengan beban Lampu

Hasil dari sinyal *output* beban ditunjukkan pada Gambar 4.5. Frekuensi yang ditentukan adalah 50 Hz dengan periode 20 ms, *duty cycle* 50%. Berdasarkan parameter pengukuran pada lampu pijar 25 W, menghasilkan tegangan 161 VAC, arus 0,10 A, daya 24 W. Pada bagian *input* DC terukur tegangan sebesar 30 VDC, arus 0,98 A, daya 28,39 W. Pengukuran melalui multimeter digital pada inverter, menunjukkan tegangan *input* DC 29,66 V. Pengukuran tegangan *output* AC pada Inverter sebesar 23,24 V.

Efisiensi dari pengujian tersebut adalah 81%. Pengujian terhadap beban, mempengaruhi perubahan level tegangan *output*. Sebelum terhubung beban, *output* tegangan Inverter tersebut adalah 25,96 VAC. Setelah terhubung dengan beban, *output* tegangan Inverter menjadi 23,24 VAC. Maka, terjadi penurunan level tegangan sebesar 2,72 VAC. Pada Gambar 4.5 *output* gelombang berbentuk *square wave*. sinyal referensi dan sinyal *carrier* pada gelombang ini seimbang, dengan $T_{on}=10$ ms dan $T_{off}=10$ ms.

Saat dihubungkan dengan beban lampu pijar 25 W, tegangan *output* inverter menjadi 161 VAC. Terjadi penurunan tegangan sebesar 59 VAC. Penyebab dari penurunan tegangan saat dihubungkan beban terdiri dari beberapa faktor. Pertama, inverter tersebut didesain dengan kapasitas *input* tegangan kecil yaitu 15- 30 VDC. Tegangan rendah sangat reaktif berpengaruh terhadap perubahan beban. Tegangan kecil menghasilkan daya yang sesuai dengan arus pada tegangan. Hal ini berlaku rumus $P = V \times I$. Daya 30 W perlu memperhitungkan total beban yang dibutuhkan. Daya yang tersedia harus mampu menampung arus yang dibutuhkan beban. Sehingga arus yang disuplai sesuai dengan pembebanan. Jika total daya yang dibutuhkan besar dan arus sumber kecil, maka daya sumber tidak mampu memenuhi kebutuhan beban sehingga tegangan *output* semakin rendah. Analoginya seperti beban yang digunakan pada 1 rumah. Total daya pada beban yang dibutuhkan misalnya 1500 VA. Maka dengan daya 2200 VA dari PLN cukup menampung beban tersebut. Tegangan stabil 220 karena daya yang tersedia besar.

Faktor berikutnya, disebabkan karena lampu pijar bersifat resistif. Beban resistif merupakan komponen resistansi murni dengan tahanan (Ω). Beban resistif punya sifat pasif yaitu tidak mampu memproduksi listrik, sehingga menjadi konsumen listrik. Beban resistif bersifat menahan arus listrik. Tahanan / Resistor menghalangi aliran elektron yang melewatinya, sehingga memproduksi penurunan tegangan. Penurunan tegangan terkonversi menjadi panas. Hal tersebut yang menyebabkan tegangan Inverter turun saat dihubungkan beban. Penurunan tegangan dari 220 VAC menjadi 161 VAC menyebabkan *losses* / rugi tegangan. *Losses* menjadi penyebab dari *drop voltage* / tegangan jatuh pada inverter. Tegangan jatuh merupakan tegangan yang hilang akibat komponen tertentu sehingga nilainya berada dibawah batas yang ditetapkan. Tegangan jatuh akan semakin besar jika beban yang dihubungkan ke Inverter punya nilai tahanan semakin besar. Beban resistif yang nilai tahanannya besar akan menyebabkan kenaikan arus. Jumlah Kenaikan arus yang dibutuhkan seiring dengan penambahan beban resistif yang digunakan. Arus yang besar membutuhkan daya yang besar. Semakin besar beban, butuh arus *input* yang besar sehingga tegangan pada Inverter semakin turun. Maka beban lampu pijar menyebabkan terjadinya tegangan jatuh. Rugi-rugi tegangan juga dipengaruhi oleh panjang dan luas penampang penghantar pada kabel.

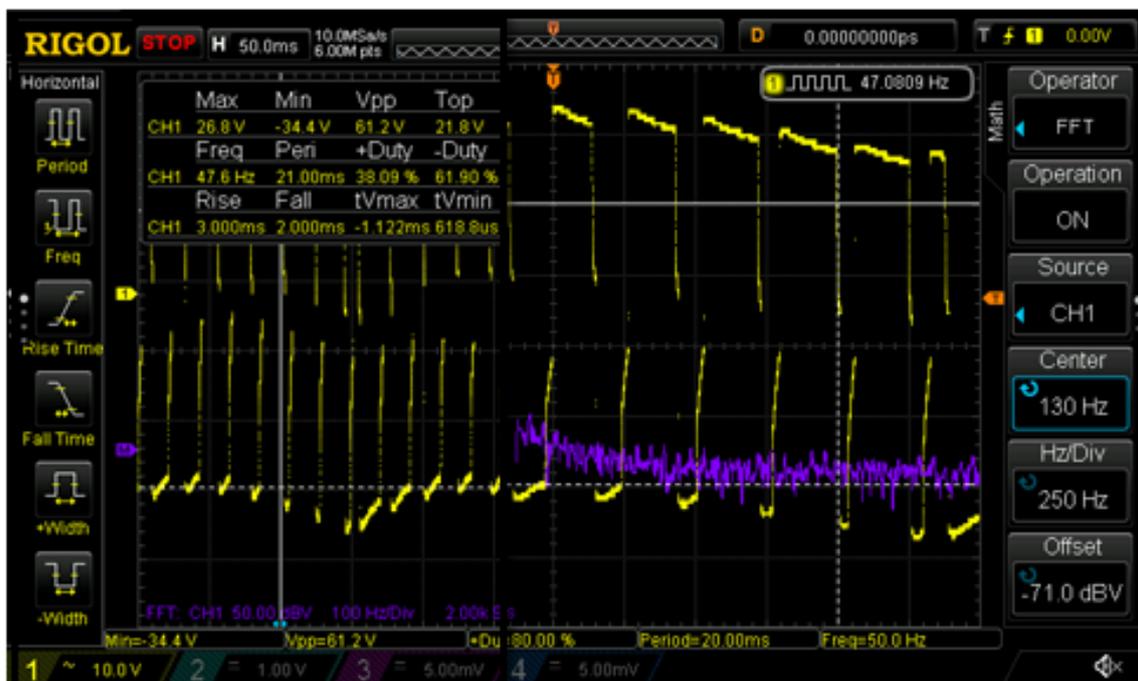


Gambar 4.5 *output* beban 25 W

4.6 Hasil dengan Rasio Modulasi Frekuensi 18

Sampling gelombang *output* inverter menggunakan SPWM *Bipolar switching* seperti pada Gambar 4.6. Caranya dengan variasi 9 *duty cycle* melalui pemrograman Arduino. Parameter *duty cycle* yang digunakan dalam rasio persen adalah 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 85%, dan 80%. Frekuensi sinyal referensi yang diatur yaitu 50 Hz. Hasil periodenya adalah 20 ms, maka sesuai dengan hasil pada osiloskop. $\frac{1}{2}$ dari periode adalah 10 ms. Dalam 1 gelombang kotak, dari 9 sampling mempunyai nilai periode 1,1 ms. Pada pengujian ini, Penulis menentukan nilai m_f sebesar 18. m_f adalah perbandingan frekuensi sinyal *carrier* dengan frekuensi sinyal referensi. Tahapan pertama mengetahui frekuensi sinyal *carrier*. Nilai frekuensi tersebut didapat dari $\frac{1}{2}$ dibagi nilai periode satu gelombang kotak pada variasi 9 *duty cycle*. Frekuensi *carrier* adalah $f_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,1} \times 10^{-3} = 909$ Hz. Setelah diketahui frekuensi *carrier*, digunakan rumus perbandingan Rasio Modulasi Frekuensi. Nilai m_f adalah $m_f = \frac{F_{tri}}{F_{ref}} = \frac{909}{50} = 18$.

Berikut adalah nilai T_{high} dan T_{low} dari masing – masing variasi 9 *duty cycle* . 1,1 ms adalah nilai periode pada 1 sampling gelombang kotak. Nilai T_{high} didapat dari nilai *duty cycle* dikali 1 periode sampling. Nilai T_{low} didapat dari nilai 1 periode sampling dikurang dengan nilai T_{high} . *Duty cycle* 25% menghasilkan T_{high} 0,275 ms dan T_{low} 0,825 ms. *Duty cycle* 30% menghasilkan T_{high} 0,33 ms dan T_{low} 0,77 ms. *Duty cycle* 40% menghasilkan T_{high} 0,44 ms dan T_{low} 0,66 ms. *Duty cycle* 50% menghasilkan T_{high} 0,55 ms dan T_{low} 0,55 ms. *Duty cycle* 60% menghasilkan T_{high} 0,66 ms dan T_{low} 0,44 ms. *Duty cycle* 70% menghasilkan T_{high} 0,77 ms dan T_{low} 0,33 ms. *Duty cycle* 80% menghasilkan T_{high} 0,88 ms dan T_{low} 0,22 ms. *Duty cycle* 85% menghasilkan T_{high} 0,935 ms dan T_{low} 0,165 ms. *Duty cycle* 80% menghasilkan T_{high} 0,88 ms dan T_{low} 0,22 ms.



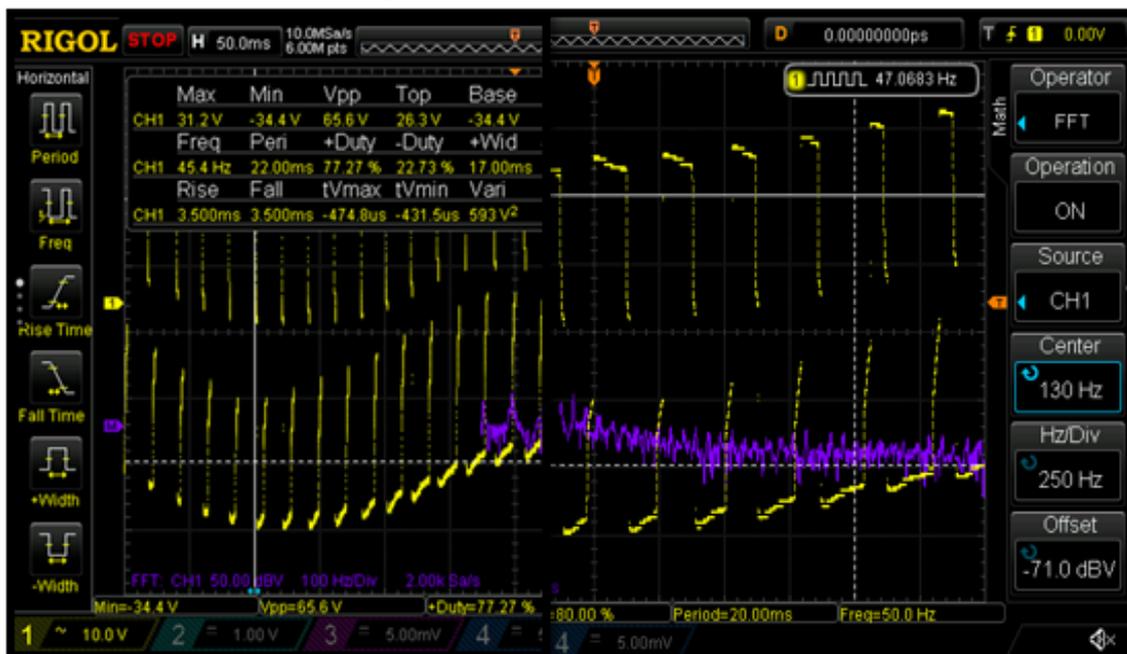
Gambar 4.6 Hasil $m_f = 18$

4.7 Hasil dengan Rasio Modulasi Frekuensi 36

Hasil sampling sebanyak 18 ditunjukkan pada Gambar 4.7. Proses sampling ini menggunakan SPWM *Bipolar switching*. Caranya dengan variasi 18 *duty cycle* dalam periode gelombang. Nilai *duty cycle* yang divariasi dengan satuan persen. Parameter nilai tersebut adalah 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 85%, 80%, 75%, 70%, 65%, 60%, 55%, 50%, 40%, 30%, dan 25%. Frekuensi sinyal referensi adalah 50 Hz. Periode nya adalah 20 ms. $\frac{1}{2}$ dari periode gelombang adalah 10 ms. Nilai 1 gelombang kotak, dari 18 sampling adalah 0,55 ms. Pada pengujian tersebut, nilai m_f yang ditentukan adalah 36. Untuk mengetahui nilai frekuensi *carrier*

digunakan rumus $f_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,55} \times 10^{-3} = 1818$ Hz. Nilai Rasio Modulasi Frekuensi adalah $m_f = \frac{F_{tri}}{F_{ref}} = \frac{1818}{50} = 36$.

Nilai lebar pulsa pada tiap variasi 18 *duty cycle*, akan dirinci sebagai berikut. Rumus perhitungannya sama dengan sampling 9 kali. 0,55 ms adalah nilai periode pada 1 sampling gelombang kotak. *Duty cycle* 25% menghasilkan T_{high} 0,1375 ms dan T_{low} 0,4125 ms. *Duty cycle* 30% menghasilkan T_{high} 0,165 ms dan T_{low} 0,385 ms. *Duty cycle* 40% menghasilkan T_{high} 0,22 ms dan T_{low} 0,33 ms. *Duty cycle* 50% menghasilkan T_{high} 0,275 ms dan T_{low} 0,275 ms. *Duty cycle* 55% menghasilkan T_{high} 0,3025 ms dan T_{low} 0,2475 ms. *Duty cycle* 60% menghasilkan T_{high} 0,33 ms dan T_{low} 0,22 ms. *Duty cycle* 65% menghasilkan T_{high} 0,3575 ms dan T_{low} 0,1925 ms. *Duty cycle* 70% menghasilkan T_{high} 0,385 ms dan T_{low} 0,165 ms. *Duty cycle* 75% menghasilkan T_{high} 0,4125 ms dan T_{low} 0,1375 ms. *Duty cycle* 80% menghasilkan T_{high} 0,44 ms dan T_{low} 0,11 ms. *Duty cycle* 85% menghasilkan T_{high} 0,47 ms dan T_{low} 0,08 ms.



Gambar 4.7 Hasil $m_f = 36$

Pensaklaran bipolar SPWM diujikan dengan Rasio Modulasi Frekuensi 18 dan 36. Dari hasil tersebut, nilai m_f berpengaruh terhadap kualitas *output* inverter. Bentuk gelombangnya semakin rapat hingga frekuensi sinyal *carrier* semakin besar. Hal ini dipengaruhi dengan mengatur teknik *switching* yang cepat. Proses kontrol *switch* yang dimodulasi semakin banyak akan mengurangi harmonik yang muncul pada gelombang tersebut. Sehingga bentuk gelombang yang renggang akan memiliki harmonik yang besar. Hal tersebut menyatakan bahwa harmonik yang besar akan memperburuk kualitas *output* inverter.

Nilai m_f yang ditambah akan meningkatkan kualitas dari inverter. Maka jika menambah nilai m_f dengan teknik variasi *duty cycle* akan diperoleh harmonik terendah pada inverter. Inverter akan mempunyai kualitas yang baik, sehingga piranti tersebut terhindar dari potensi kerusakan peralatan listrik. Besarnya nilai m_f yang mengindikasikan harmonik semakin baik, dapat terbukti melalui analisa harmonik yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Analisa harmonik dinyatakan dalam bentuk persamaan *Total Harmonic Distortion*. Perhitungan THD arus hingga harmonik orde ke 11 mendapatkan hasil sebesar 11%. Berdasarkan analisa harmonik pada gelombang Gambar 4.6, nilai m_f 18 menghasilkan nilai THD arus sebesar 4%. Perhitungan berikutnya analisa harmonik pada Gambar 4.7, nilai m_f 36 menghasilkan besar THD arus 2%. Dari nilai *Total Harmonic Distortion*, dapat diketahui indeks besar harmonik yang muncul pada gelombang *output* inverter. Hasil tersebut menyatakan dari harmonik ke 11, jumlah harmonik diperkecil dengan memvariasi nilai m_f 18. Dengan memilih nilai m_f yang semakin besar yaitu 36, nilai harmonik dapat berkurang melalui turunnya nilai Indeks THD berdasarkan Tabel 4.1. Kualitas *output* pada inverter ini mengindikasikan baik, karena nilai m_f yang ditentukan mengurangi harmonik pada gelombang tersebut.

Tabel 4.1 Perbandingan orde harmonik pada $m_f=18$ dan $m_f=36$

Bipolar $m_f=18$		Bipolar $m_f=36$	
f_n (Hz)	I_n (A)	f_n (Hz)	I_n (A)
50	0,085	50	0,090
850	0,00179	1750	0,00087
900	0,00318	1800	0,00159
950	0,0016	1850	0,00082
I_{rms}	0,0046	I_{rms}	0,0023
THD_i	4%	THD_i	2%

Rasio Modulasi Frekuensi tidak akan mengubah frekuensi referensi. Nilai m_f tidak mempengaruhi nilai amplitudo dan nilai tegangan. Dari kedua nilai m_f pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7, menampilkan bentuk spektrum frekuensi. Dalam bahasa lain disebut FFT atau *Fast Fourier Transform*. FFT mentransformasi sinyal waktu atau periode ke sinyal frekuensi. Sinyal periode dari *output* tersebut, dicuplik menjadi domain frekuensi. Proses mengubahnya dengan algoritma *fourier diskrit*. Maka FFT akan mempercepat proses perhitungan. Pada hasil m_f 18 dan 36 menunjukkan nilai spektrum frekuensi sebesar 100 Hz/div dan 50 dBV.

4.8 Analisa Teoritis Sinyal Output

Diketahui dari inverter yang telah dibuat, bahwa $V_{sumber} = 30 \text{ VDC}$, beban $R = 153,7 \Omega$,

$$V_{max} = 51,2 \text{ V}, V_{rms} = 36,2 \text{ V}.$$

- Nilai komponen dasar tegangan *output* efektif (V_1)

$$V_1 = 1 \times V_s = 1 \times 30 = 30 \text{ V}$$

- Daya *output* inverter

$$P_o = \frac{(V_s)^2}{R} = \frac{(30)^2}{153,7} = 5,8 \text{ W}$$

- Arus puncak Transistor bipolar

$$I = \frac{30}{153,7} = 0,19 \text{ A}$$

I rata rata transistor, saat *duty cycle* yang di atur 50%

$$I_d = 50\% \times I_{bipolar} = 0,5 \times 0,19 = 0,095 \text{ A}$$

- Total Harmonik Distorsi

$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_{max}$ untuk nilai V_{max} di ketahui adalah 51,2 V. Maka nilai V_{rms} adalah

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 51,2 = 36,2 \text{ V}$$

Nilai RMS fundamental $V_{1,rms} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21,2 \text{ V}$

THD tegangan adalah

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} = 2\%$$

THD arus hingga harmonik ke 11

$$THDi = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2}{I_{1,rms}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,013}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,0046}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,0022}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,0013}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,00082}{\sqrt{2}}\right)^2}}{0,94/\sqrt{2}} = 11\%$$

4.9 Analisa Teoritis Komponen Harmonik Sinyal Output

Hasil *deret fourier* Inverter SPWM, ditunjukkan pada Tabel 4.1. Pada *output* Inverter *H-Bridge*, analisa *deret fourier* hanya mengandung harmonik orde ganjil. Sehingga hanya orde ganjil yang dinyatakan pada komponen harmonik.

Tabel 4.2 Tabel Komponen Harmonik

n	$f_n (Hz)$	$V_n (V)$	$Z_n (\Omega)$	$I_n (A)$
1	50	38,1	349,5	0,94
3	150	12,5	954,4	0,013
5	250	7,3	1577	0,0046
7	350	5,05	2203	0,0022
9	450	3,7	2830	0,0013
11	550	2,85	3454	0,00082

Analisa *deret fourier* terdiri dari nilai tegangan harmonik, impedansi harmonik, dan arus harmonik. Rumus dari perhitungan tersebut, terdapat pada bab II bagian tinjauan teori. Pada Tabel 4.2, nilai harmonik orde ganjil yang digunakan adalah $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11$. Semakin bertambah nilai harmonik, maka frekuensi harmonik semakin besar. Pensaklaran bipolar SPWM menggunakan perhitungan harmonik orde ganjil. Tiap bertambahnya nilai orde ganjil, berpengaruh terhadap tegangan harmonik dan komponen harmonik lainnya. Ketika nilai n bertambah, hasil komponen harmonik tegangan dan arus semakin kecil. Namun, nilai orde ganjil mempengaruhi harmonik impedansi yang semakin besar.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil Penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa

1. Inverter PWM tipe *H-Bridge* satu fasa sebelum dihubung trafo, mampu mengubah tegangan *input* 30 VDC menjadi *output* 25,99 VAC. Sehingga piranti tersebut dapat berfungsi sesuai dengan teori. Fungsinya mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC.
2. Inverter ini mempunyai spesifikasi *H-Bridge* 1 fasa, *range input* 15-30 VDC, *output* inverter 25,96 VAC, *output* alat 220 VAC, daya *output* 30 W, efisiensi 81%, frekuensi 50 Hz, *duty cycle* 50%, I_{max} 1 A, *output* gelombang *square wave*. Hasil pengujian beban dengan lampu pijar 25 W berdasarkan pengukuran yaitu tegangan 161 VAC, arus 0,10 A, daya 24 W, efisiensi 81% .
3. Nilai m_f yang ditentukan 18 dan 36 sehingga variasi m_f menurunkan nilai harmonik. Pengaruh terhadap gelombang yang dihasilkan semakin rapat dan frekuensi *carrier* semakin besar. Dari sisi penampilan m_f tersebut, maka semakin tinggi nilai m_f mengindikasikan harmonik pada sinyal tersebut lebih bagus, sehingga kualitas dari *output* inverter semakin baik.

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. Menambah nilai m_f dengan melakukan sampling nilai, berupa variasi *duty cycle* yang berbeda beda.
2. Mencari nilai Rasio Modulasi Amplitudo dan pengaruhnya terhadap *output* inverter.
3. Menambah level rangkaian *H-Bridge* agar dihasilkan gelombang kotak bertingkat.
4. Mengubah kapasitas daya inverter seperti 200 W. Daya yang lebih besar, bisa digunakan pada beban yang berkapasitas besar seperti setrika, kipas angin, dan televisi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. C. Faria and A. P. Martins, "Analysis and Characterization of a Square-Wave Modulation Method for Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters," *Int. Conf. Renew. Energies Power Qual.*, vol. 1, no. 10, 2012.
- [2] A. Singh and J. VS, "Voltage Fed Full Bridge DC-DC and DC-AC Converter for High-Frequency Inverter Using C2000," no. May, pp. 1–18, 2014.
- [3] T. Elektro, S. T. Teknologi, P. Maritim, and N. Indonesia, "IMPLEMENTASI SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION PADA INVERTER SATU FASE BERBASIS LOOKUP TABLE MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER 16-BIT," *PWM Invert.*, no. November, pp. 1–2, 2017.
- [4] S. Y. Panggabean, F. X. A. Setyawan, and S. Alam, "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Menggunakan Teknik High Voltage PWM (Pulse Width Modulation)," *PWM High Volt.*, vol. 11, no. 2, 2012.
- [5] M. Ahmed, A. Sheir, and M. Orabi, "Asymmetric cascaded half-bridge multilevel inverter without polarity changer," *Alexandria Eng. J.*, 2017.
- [6] D. R. P and M. G. E, "Study of Single Phase H-Bridge Inverter Using Various Sinusoidal Pwm Techniques," vol. 3, no. August, pp. 240–243, 2015.
- [7] Y. A. Sinaga, A. S. Samosir, and A. Haris, "Rancang Bangun Inverter 1 Fasa dengan Kontrol Pembangkit Pulse Width Modulation (PWM)," *Electrician*, vol. 11, no. 2, pp. 81–90, 2017.
- [8] N. Susheela and P. S. Kumar, "Performance Evaluation of Carrier Based PWM Techniques for Hybrid Multilevel Inverters with Reduced Number of Components," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 635–642, 2017.
- [9] D. Zammit *et al.*, "A new topology for cascaded H-bridge multilevel inverter with PI and Fuzzy control," *Energy Procedia*, vol. 117, no. 0, pp. 917–926, 2017.
- [10] F. B. Diagram, "General Purpose 6-Pin Phototransistor Optocouplers," no. March, pp. 1–9, 2007.
- [11] F. Induction, M. Speed, and K. Kunci, "Pengaruh teknik modulasi pwm pada keluaran inverter tiga fase untuk pengaturan kecepatan variabel motor induksi," vol. 2, no. 1, pp. 32–39, 2015.

- [12] D. Zammit, C. Spiteri Staines, and M. Apap, "Compensation techniques for non-linearities in H-bridge inverters," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 361–376, 2016.
- [13] V. B. Mary, I. W. Christopher, and G. Themozhi, "3- Switch Single-Phase Inverter for PV System," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 674–681, 2017.
- [14] A. J. I. P. Raga, J. T. Elektro, F. Teknik, U. Lampung, and B. Lampung, "HARMONISA MULTILEVEL INVERTER SATU FASA TIPE H-BRIDGE," 2017.
- [15] N. V. kumar, V. K. Chinnaiyan, M. Pradish, and S. P. Karthikeyan, "Simulated Annealing Based Selective Harmonic Elimination for Multi-level Inverter," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 855–861, 2017.
- [16] G. Description and T. Application, "LM1575 / LM2575 / LM2575HV Series SIMPLE SWITCHER 1A Step-Down Voltage Regulator SIMPLE SWITCHER ® 1A Step-Down Voltage Regulator," no. August, pp. 1–27, 2004.
- [17] A. P. Technology, F. Switching, F. A. Rated, and S. D. Requirements, "IRF640N / S / L," pp. 1–11.

LAMPIRAN

Lampiran 1

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode (10,OUTPUT);
  pinMode (11,OUTPUT);
  digitalWrite (10,LOW);
  digitalWrite (11,LOW);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  digitalWrite (10,HIGH);
  digitalWrite (11,LOW);
  delay (19);
  digitalWrite (10,LOW);
  digitalWrite (11,LOW);
  delay (1);
  digitalWrite (10,LOW);
  digitalWrite (11,HIGH);
  delay (19);
  digitalWrite (10,LOW);
  digitalWrite (11,LOW);
  delay (1);
}
```

Program Arduino untuk Inverter *H-Bridge* 1 fasa dengan PWM pin 10 dan pin 11.

Lampiran 2

```
void setup() {
  void pwm_duty(int percent) {
    int delay_on,delay_off;
    delay_on=map (percent,0,100,0,20000);
    delay_off=map ((100-percent),0,100,0,20000);

    digitalWrite (10,HIGH);
    digitalWrite (11,LOW);
    delayMicroseconds (delay_on-1000);
    digitalWrite (10,LOW);
    digitalWrite (11,LOW);
    delay (1);
    digitalWrite (10,LOW);
    digitalWrite (11,HIGH);
    delayMicroseconds (delay_off-1000);
    digitalWrite (10,LOW);
    digitalWrite (11,LOW);
    delay (1);
  }

  delay (1);
  pwm_duty (80);
  delay (1);
  pwm_duty (85);
  delay (1);
  pwm_duty (80);
  delay (1);
  pwm_duty (75);

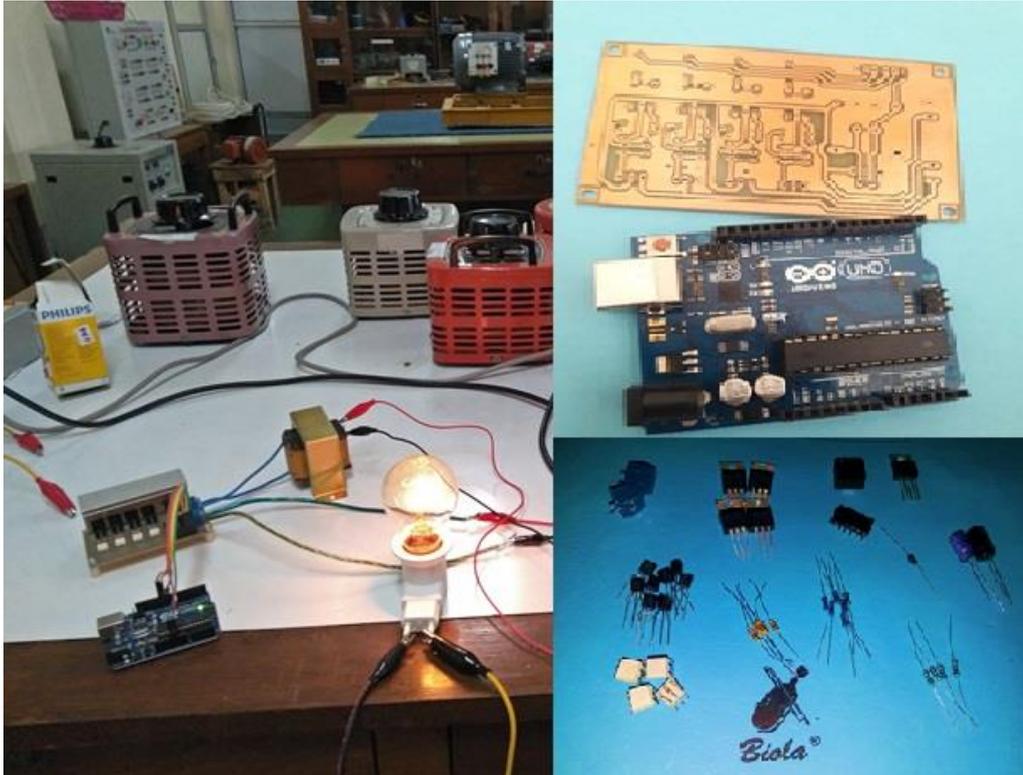
  delay (1);
  pwm_duty (70);
  delay (1);
  pwm_duty (65);
  delay (1);
  pwm_duty (60);
  delay (1);
  pwm_duty (55);
  delay (1);
  pwm_duty (50);
  delay (1);
  pwm_duty (40);
  delay (1);
  pwm_duty (30);
  delay (1);
  pwm_duty (25);
  delay (1);
}

void pwm_duty(int percent) {
  int delay_on,delay_off;
  delay_on=map (percent,0,100,0,20000);
  delay_off=map ((100-percent),0,100,0,20000);

  digitalWrite (10,HIGH);
  digitalWrite (11,LOW);
  delayMicroseconds (delay_on-1000);
  digitalWrite (10,LOW);
  digitalWrite (11,LOW);
```

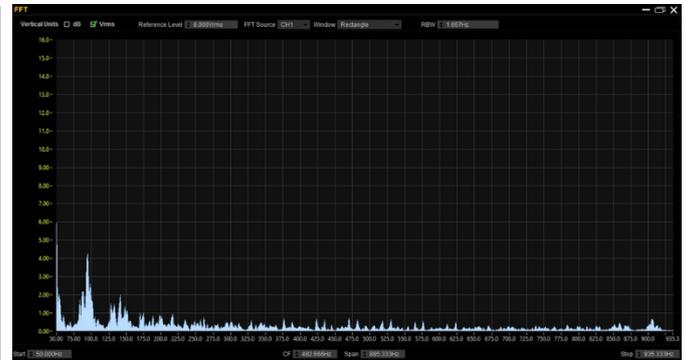
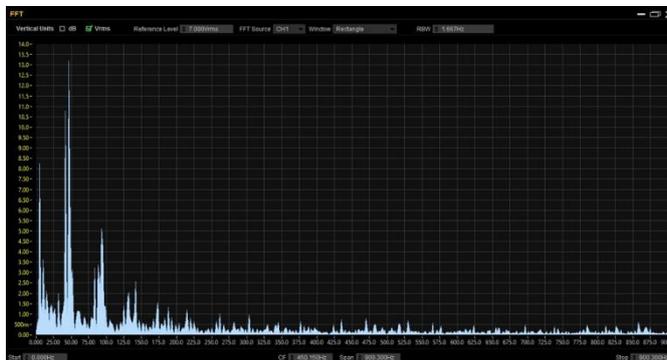
Program SPWM *Bipolar switching* untuk variasi 9 dan 18 *duty cycle* dengan menggunakan pin 10 dan pin 11 pada Arduino.

Lampiran 3

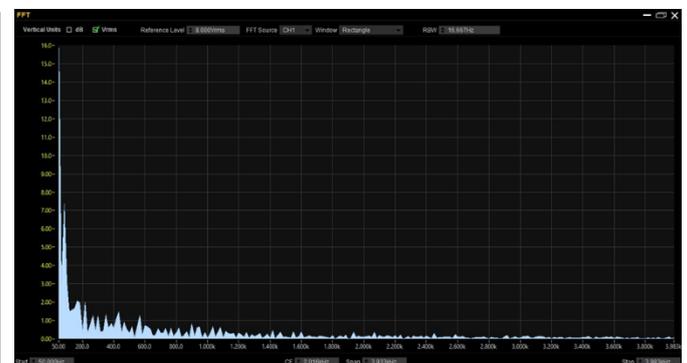
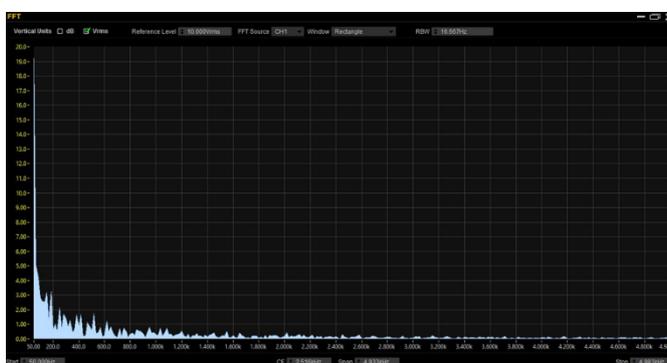


Hardware Inverter SPWM, pembuktian Alat dengan beban, dan komponen komponen inverter.

Lampiran 4



Hasil m_f 18 dan m_f 36 output inverter.



Hasil m_f 18 dan m_f 36 output inverter setelah dihubung dengan beban Resistif.