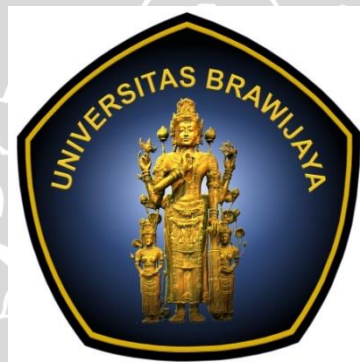


**RANCANG BANGUN INVERTER SATU FASA SINUSOIDAL UNTUK BEBAN
RUMAH TANGGA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik



FADIANTO MIRZA

NIM. 115060300111075

KEMENTRIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PENGESAHAN

**RANCANG BANGUN INVERTER SATU FASA SINUSOIDAL UNTUK BEBAN
RUMAH TANGGA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik



FADIANTO MIRZA

NIM. 115060300111075

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi
pada tanggal 6 Oktober 2015

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Eka Maulana, ST., M.T., M.Eng.
NIP. 2012018430 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 6 Oktober 2015
Mahasiswa,

Fadianto Mirza
NIM. 115060300111075



PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan berkat rahmat dan karunia-Nya skripsi dengan judul “Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Sinusoidal Untuk Beban Rumah Tangga” dapat diselesaikan. Delapan bulan lamanya penulis menenuntaskan penyusunan skripsi ini. Banyak rintangan dan halangan yang harus penulis lalui semata untuk membahagiakan kedua orang tua. Penulis menyadari bahwa kajian skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak, karenanya penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
2. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
3. Ir. Soeprpto, M.T selaku dosen pembimbing pada penyusunan skripsi ini.
4. Eka Maulana, S.T., M.T., M.Eng selaku dosen pembimbing pada penyusunan skripsi ini.
5. Kedua orang tua tercinta, Mudjiyanto dan Fadilah yang senantiasa mendoakan, memberikan nasihat, kasih sayang, dan perhatian selama ini. Serta kedua saudara kandung, mbak Fani dan Fadio yang terus memberikan semangat.
6. Bapak dan Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
7. Teman – teman HEP yang sudah menjadi saudara sendiri. Terima kasih atas semua bantuan dan dukungannya.
8. Teman – teman dari Tim Robot Elektro UB yang tanpa henti-hentinya memberikan bantuan dan dukungan. Sukses dengan KRI tahun ini dan seterusnya.

Tiada yang sempurna di dunia ini, tersadar bahwa skripsi ini sangat jauh dari kesempurnaan. Karenanya, segala kritik dan saran yang sifatnya membangun tentang skripsi ini akan diterima dengan senang hati. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan

Malang, September 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusah masalah.....	2
1.3 Batasan masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
1.6 Sistematika laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Inverter	4
2.2 MOSFET	7
2.3 Mikrokontroler ATmega16.....	10
2.4 <i>Driver</i> MOSFET	11
2.5 <i>Snubber</i>	13
2.6 Harmonisa	14
2.7 <i>Low pass filter</i> LC.....	16
2.8 Transformator.....	17
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Studi literatur.....	19
3.2 Perancangan alat.....	19
3.3 Simulasi.....	20
3.4 Pengujian alat	20
3.5 Pengambilan kesimpulan dan saran	20
BAB IV PERANCANGAN DAN SIMULASI	21

4.1 Perancangan spesifikasi tiap balok.....	21
4.2 Perancangan spesifikasi tiap balok.....	22
4.3 Perancangan perangkat keras	22
4.3.1 Rangkaian catu daya.....	22
4.3.2 Rangkaian mikrokontroler.....	23
4.3.3 Rangkaian <i>full bridge</i> inverter	24
4.3.4 Rangkaian <i>driver</i> MOSFET.....	25
4.3.5 <i>Snubber</i>	27
4.4 Perancangan perangkat lunak.....	28
4.5 Simulasi.....	29
4.5.1 Simulasi <i>switching</i> MOSFET	29
4.5.2 Simulasi rangkaian <i>full bridge</i> inverter	33
4.5.3 Simulasi <i>low pass</i> filter.....	35
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT	37
5.1 Pengujian rangkaian catu daya.....	37
5.2 Pengujian sinyal <i>switching</i> pada mikrokontroler	38
5.3 Pengujian rangkaian <i>driver</i> MOSFET.....	40
5.4 Pengujian rangkaian <i>full bridge</i> inverter.....	41
5.4.1 Pengujian tanpa beban	42
5.4.2 Pengujian berbeban.....	44
5.5 Pengujian transformator	50
5.6 Pengujian sistem keseluruhan	52
5.6.1 Pengujian THD dengan beban bervariasi	55
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	58
6.1 Kesimpulan.....	58
6.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
BAB VII LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

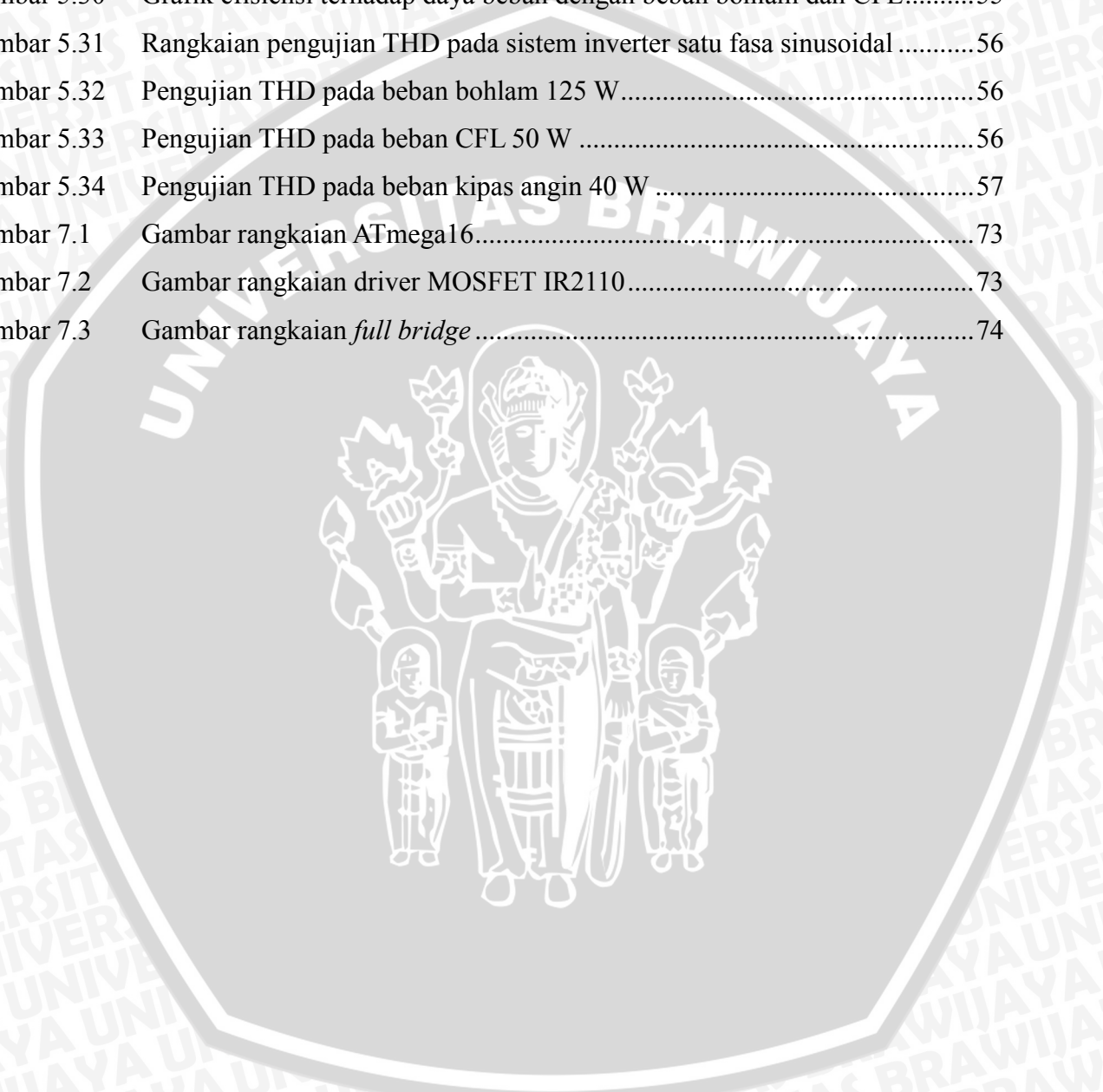
No	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Waktu nyala padam sinyal pada simulasi PSIM, $m_a = 1$	32
Tabel 4.2	<i>Look up table</i> $m_a = 1$	33
Tabel 4.3	Nilai frekuensi <i>switching</i> dan dasar	34
Tabel 4.4	Perbandingan tegangan keluaran <i>full bridge</i> inverter teori dan simulasi.....	35
Tabel 5.1	Hasil pengujian <i>full bridge</i> inverter tanpa beban dengan variasi nilai m_a	44
Tabel 5.2	Hasil pengujian <i>full bridge</i> inverter dengan variasi nilai m_a	46
Tabel 5.3	Hasil pengujian THD dengan fluke 43B.....	49
Tabel 5.4	Hasil pengujian THD <i>full bridge</i> inverter dengan m_a bervariasi	49
Tabel 5.5	Hasil pengujian transformator hubung buka.....	50
Tabel 5.6	Hasil pengujian transformator hubung singkat	51
Tabel 5.7	Hasil pengujian transformator sisi belitan tegangan rendah	52
Tabel 5.8	Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban bohlam.....	53
Tabel 5.9	Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban CFL	53
Tabel 5.10	Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban kipas angin	53
Tabel 5.11	Efisiensi sistem pada tiap beban	55
Tabel 5.12	Hasil pengujian THD pada sistem inverter satu fasa sinusoidal.....	57
Tabel 7.1	<i>Look up table</i> dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 1$)	65
Tabel 7.2	<i>Look up table</i> dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0,9$)	67
Tabel 7.3	<i>Look up table</i> dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0,8$)	69
Tabel 7.4	<i>Look up table</i> dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0,7$)	71

DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	<i>Full bridge</i> inverter	5
Gambar 2.2	SPWM dengan metode <i>unipolar</i>	6
Gambar 2.3	MOSFET kanal N dengan dioda balik.....	8
Gambar 2.4	Kurva karakteristik MOSFET.....	8
Gambar 2.5	Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah <i>cut off</i>	9
Gambar 2.6	Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah saturasi.....	9
Gambar 2.7	Pin ATMega16	11
Gambar 2.8	Metode bootstrap untuk menghasilkan tegangan ambang	12
Gambar 2.9	Blok diagram IR2110.....	13
Gambar 2.10	Konfigurasi <i>snubber</i>	14
Gambar 2.11	Gelombang fundamental dan harmonisa	15
Gambar 2.12	Rangkaian <i>low pass</i> filter LC.....	16
Gambar 2.13	Transformator.....	17
Gambar 3.1	Diagram alir metode penelitian.....	19
Gambar 4.1	Diagram balok sistem inverter satu fasa sinusoidal	21
Gambar 4.2	Rangkaian catu daya	23
Gambar 4.3	Rangkaian mikrokontroler ATMega16	23
Gambar 4.4	Rangkaian <i>full bridge</i> inverter	24
Gambar 4.5	Karakteristik arus terhadap suhu IRF3710	25
Gambar 4.6	Rangkaian <i>driver</i> MOSFET	26
Gambar 4.7	<i>Flowchart</i> program keseluruhan	29
Gambar 4.8	Perencanaan sinyal <i>switching</i> pada PSIM.....	30
Gambar 4.9	Komparasi sinyal sinusoida dan segitiga pada PSIM	30
Gambar 4.10	Hasil komparasi sinyal sinusoida dan segitiga.....	30
Gambar 4.11	Hasil komparasi pada saklar S_1 dan S_3 (<i>high side</i>)	31
Gambar 4.12	Hasil komparasi pada saklar S_3 dan S_4 (<i>low side</i>).....	31
Gambar 4.13	Rangkaian <i>full bridge</i> inverter tanpa beban	34
Gambar 4.14	Sinyal keluaran <i>full bridge</i> inverter, $m_a = 1$	34
Gambar 4.15	Simulasi <i>full bridge</i> beserta filter LC dan rangkaian ekivalen transformator	35

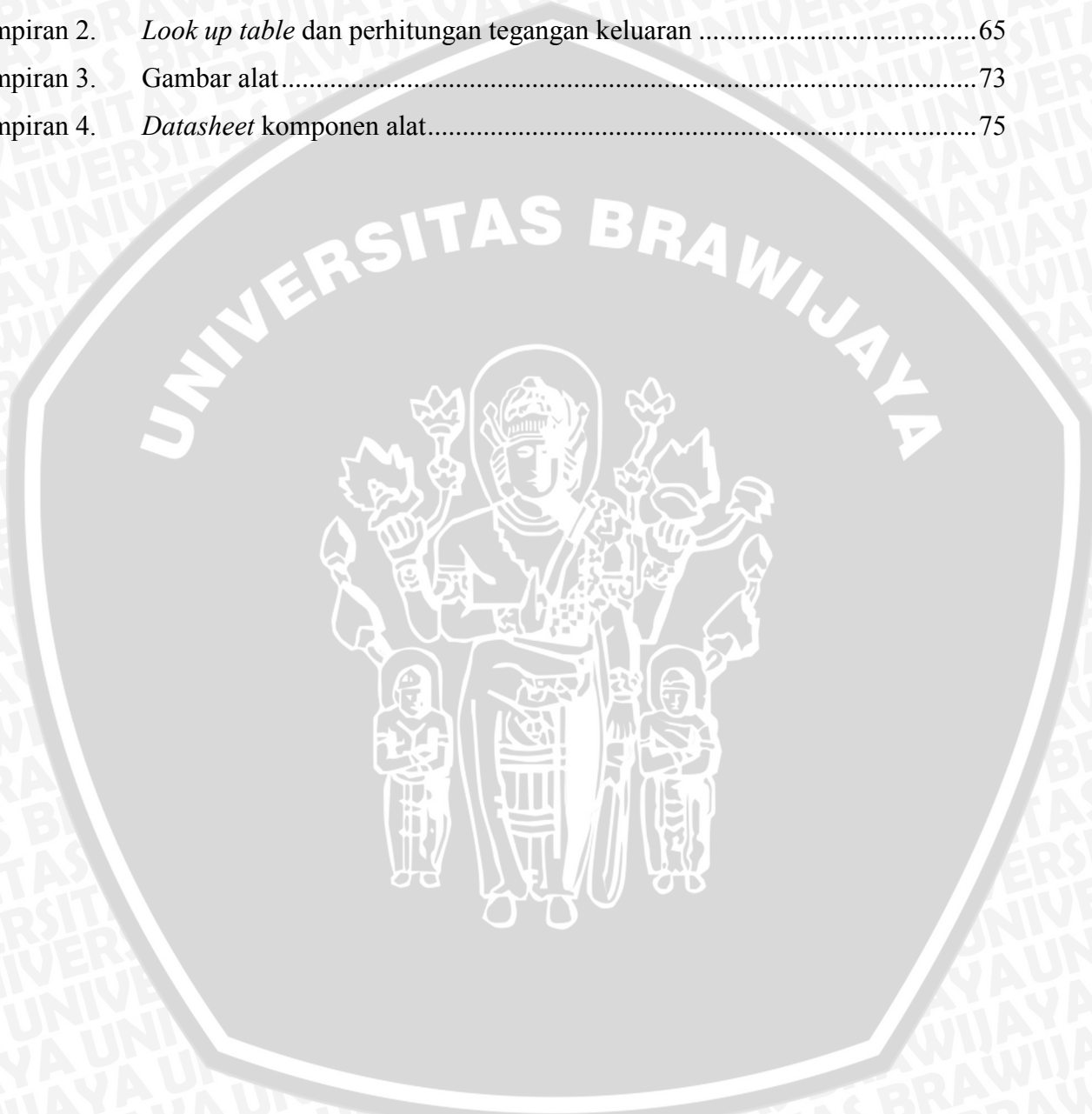
Gambar 4.16	Bentuk gelombang tegangan keluaran pada filter dan tegangan dan arus pada rangkaian ekuivalen transformator	36
Gambar 5.1	Diagram balok pengujian catu daya.....	37
Gambar 5.2	Hasil pengujian rangkaian catu daya menggunakan osiloskop.....	38
Gambar 5.3	Diagram balok pengujian <i>switching</i> mikrokontroler	38
Gambar 5.4	Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.7$).....	39
Gambar 5.5	Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.8$).....	39
Gambar 5.6	Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.9$).....	39
Gambar 5.7	Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 1$).....	40
Gambar 5.8	Diagram balok pengujian driver MOSFET.....	40
Gambar 5.9	Hasil pengamatan osiloskop pada <i>high side gate driver</i> MOSFET dan mikrokontroler	41
Gambar 5.10	Hasil pengamatan osiloskop pada <i>low side gate driver</i> MOSFET dan mikrokontroler	41
Gambar 5.11	Diagram balok pengujian rangkaian <i>full bridge</i> inverter.....	42
Gambar 5.12	Hasil pengamatan osiloskop pada tegangan keluaran <i>full bridge</i> inverter ($m_a = 0.8$).....	42
Gambar 5.13	Hasil pengamatan osiloskop pada setengah periode tegangan keluaran <i>full bridge</i> inverter ($m_a = 0.8$)	43
Gambar 5.14	Hasil pengamatan osiloskop pada frekuensi <i>switching</i> tegangan keluaran ($m_a = 0.8$).....	43
Gambar 5.15	Grafik karakteristik pengaturan m_a terhadap tegangan keluaran tanpa beban secara teori, simulasi, dan praktek	44
Gambar 5.16	Diagram balok pengujian berbeban pada rangkaian <i>full bridge</i> inverter.....	45
Gambar 5.17	Rangkaian pengujian efisiensi pada rangkaian <i>full bridge</i> inverter.....	45
Gambar 5.18	Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus pada keluaran <i>full bridge</i> inverter ($m_a = 0.8$, beban = 9 ohm).....	46
Gambar 5.19	Grafik efisiensi rangkaian <i>full bridge</i> terhadap nilai m_a pada rangkaian <i>full bridge</i> inverter.....	47
Gambar 5.20	Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus beban RL ($m_a = 0.7$).....	47
Gambar 5.21	Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus beban RL ($m_a = 0.7$).....	48
Gambar 5.22	Rangkaian pengujian THD pada <i>full bridge</i> inverter.....	48
Gambar 5.23	Grafik THD terhadap nilai m_a pada rangkaian <i>full bridge</i> inverter	49
Gambar 5.24	Rangkaian pengujian transformator hubung buka	50

Gambar 5.25	Rangkaian pengujian transformator hubung singkat	51
Gambar 5.26	Rangkaian pengujian sistem inverter satu fasa sinusoidal berbeban	52
Gambar 5.27	Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban bohlam 125W	53
Gambar 5.28	Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban CFL 50 W	54
Gambar 5.29	Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban kipas angin.....	54
Gambar 5.30	Grafik efisiensi terhadap daya beban dengan beban bohlam dan CFL.....	55
Gambar 5.31	Rangkaian pengujian THD pada sistem inverter satu fasa sinusoidal	56
Gambar 5.32	Pengujian THD pada beban bohlam 125 W.....	56
Gambar 5.33	Pengujian THD pada beban CFL 50 W	56
Gambar 5.34	Pengujian THD pada beban kipas angin 40 W	57
Gambar 7.1	Gambar rangkaian ATmega16.....	73
Gambar 7.2	Gambar rangkaian driver MOSFET IR2110.....	73
Gambar 7.3	Gambar rangkaian <i>full bridge</i>	74



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	<i>Listing program</i>	60
Lampiran 2.	<i>Look up table</i> dan perhitungan tegangan keluaran	65
Lampiran 3.	Gambar alat.....	73
Lampiran 4.	<i>Datasheet</i> komponen alat.....	75



RINGKASAN

Fadianto Mirza, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, September 2015, Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Sinusoidal Untuk Beban Rumah Tangga, Dosen Pembimbing: Soeprpto dan Eka Maulana.

Di Indonesia mayoritas sumber energi listrik diperoleh dari pembangkit yang disalurkan ke pelanggan melalui jaringan listrik PLN. Ketika PLN mengalami gangguan, maka aktivitas dari masyarakat juga ikut terganggu. Terdapat beberapa opsi yang salah satunya menggunakan inverter untuk mentransfer daya dari sumber DC menuju beban AC sesuai dengan kebutuhan beban rumah tangga. Namun inverter yang berada dipasaran memiliki bentuk tegangan non sinusoidal. Sedangkan pemakaian inverter dengan bentuk tegangan ini dapat menyebabkan peralatan listrik tidak berfungsi dengan normal.

Tujuan akhir dalam penelitian ini adalah dapat merencanakan dan merealisasikan inverter satu fasa sinusoidal dengan metode penyaklaran *Pulse Width Modulation* (PWM) *unipolar switching* atau dikenal luas dengan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Pada sisi keluaran *full bridge* diberi *low pass* filter agar harmonisa di sisi keluaran minimum dan transformator digunakan untuk menaikkan tegangan agar seusai dengan kebutuhan beban. Pengujian pada penelitian ini meliputi pengujian disetiap rangkaian penyusun inverter satu fasa sinusoidal yaitu meliputi mikrokontroler, driver MOSFET, *full bridge*, *low pass* filter, dan transformator.

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan efisiensi sistem maksimal berada pada nilai 53.98% dengan nilai THD yang terkandung sebesar 6.2%.

Kata kunci: Inverter, *full bridge*, sinusoidal, driver MOSFET, SPWM, *low pass* filter.

SUMMARY

Fadianto Mirza, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, September 2015, Design and Build Single Phase Sine Wave Inverter for Household Loads, Academic Supervisor: Soeprapto and Eka Maulana.

The majority of Indonesian electrical energy sources from generator is distributed to consumer from PLN's electrical system. When PLN is disturbed, the public activities will be disturbed too. There are many options will fix the situation, one of solution is using inverter to distribute power from DC source to AC load according to household loads. But the inverter that sold on the market has a non sinusoidal voltage. Using a non sinusoidal inverter cause the electrical equipment won't work properly.

The ultimate goal of this research are planning and realization single phase sine wave inverter with switching method Pulse Width Modulation (PWM) unipolar switching that widely known as Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). At full bridge output connect with low pass filter to attenuate harmonics minimum and transformer is used to step up the voltage to suitable loads demand. Examination of the research includes microcontroller, MOSFET driver, full bridge, low pass filter, and step up transformer.

Based on the test results, obtained maximum efficiency system at 53,98 % and THD value is 6,2 %.

Keywords: Inverter, full bridge, sinusoidal, MOSFET driver, SPWM, low pass filter

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Energi listrik sangat dibutuhkan oleh manusia untuk beraktivitas. Di Indonesia mayoritas sumber energi listrik diperoleh dari pembangkit yang disalurkan ke pelanggan melalui jaringan listrik PLN. Ketika PLN mengalami gangguan, maka aktivitas dari masyarakat juga ikut terganggu. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan sebuah alat untuk mengkonversi dari energi yang ada menjadi energi listrik yang sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik rumah tangga.

Seiring dengan perkembangan teknologi juga menghasilkan konsep baru dalam konversi energi listrik. Inverter menjadi salah satu solusi dimana dapat merubah listrik DC menjadi AC yang mana sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik rumah tangga. Sumber DC dapat diperoleh dari sumber energi ramah lingkungan seperti *solar cell* yang ditunjang dengan *battery backup* untuk menjaga pasokan listrik ketika *supply* energi berhenti ketika di malam hari. Tetapi kebanyakan inverter yang dijual murah dipasaran memiliki bentuk tegangan keluaran *square wave* atau *modified sine wave*. Jika peralatan listrik dihubungkan pada inverter tersebut dapat menyebabkan peralatan listrik tersebut tidak berfungsi normal disebabkan dari harmonisa yang timbul. Sedangkan inverter yang menghasilkan gelombang tegangan sinusoidal murni masih mahal dipasaran.

Untuk mengkonversi listrik DC menjadi listrik AC satu fasa dengan gelombang keluaran sinusoidal, digunakanlah teknik *switching Pulse Width Modulation* (PWM) sinusoida atau sering disebut pula dengan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Tetapi pada sisi keluaran inverter dengan metode *switching* SPWM menghasilkan tegangan yang mengandung harmonisa. Agar harmonisa di sisi keluaran inverter minimum maka di sisi keluaran inverter ditambahkan *low pass filter*. Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan beban, ditambahkan transformator pada sisi keluaran filter. Tujuan utama dari penelitian ini untuk mengetahui prinsip kerja inverter dengan metode *switching* SPWM dan juga untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan, arus, dan harmonisa dari sistem.

1.2 Rumusah masalah

Agar dapat diketahui apa yang akan dikaji dalam rancang bangun ini, terdapat beberapa perumusan masalah. Rumusan masalah tersebut antara lain:

1. Bagaimana metode pembangkitan sinyal SPWM *unipolar switching*.
2. Bagaimana pengaruh modulasi amplitudo terhadap amplitudo tegangan keluaran dari inverter.
3. Bagaimana pengaruh *low pass* filter terhadap sistem inverter satu fasa sinusoidal.
4. Berapakah efisiensi sistem inverter sinusoidal satu fasa berbasis transformator.

1.3 Batasan masalah

Akibat banyaknya kemungkinan yang akan terjadi dalam rancang bangun ini, dibutuhkan batasan-batasan masalah. Batasan masalah tersebut antara lain:

1. Perancangan dan pemnbuatan inverter satu fasa dengan menggunakan metode SPWM *unipolar switching*.
2. Kontroler dari keseluruhan sistem menggunakan ATmega16.
3. MOSFET digunakan sebagai komponen *switching* pada rangkaian *full bridge* inverter satu fasa.
4. Menggunakan *low pass* filter jenis LC pada sisi keluaran *full bridge*.
5. Sumber listrik DC dari baterai VRLA 5 Ah sebanyak 2 buah yang disusun seri.
6. Menggunakan transformator *step up* dengan daya nominal 440 VA.

1.4 Tujuan

Tujuan akhir yang diharapkan dalam skripsi ini adalah untuk mengimplementasikan inverter satu fasa sinusoidal dengan metode SPWM *unipolar switching* yang dikhususkan pada beban rumah tangga.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan penelitian ini adalah untuk memberikan rujukan tentang perancangan sistem inverter satu fasa sinusoidal yang mampu digunakan pada beban rumah tangga.

1.6 Sistematika laporan

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan manfaat, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diteliti.

BAB III : METODE PENELITIAN

Berisi tahapan penyelesaian skripsi yang meliputi studi literatur, perancangan alat, pengujian alat, pengambilan data, perhitungan, dan analisis data.

BAB IV : PERANCANGAN DAN SIMULASI

Berisi pembahasan, analisis, dan perancangan serta simulasi alat yang diajukan dalam penelitian.

BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Berisi pengujian dan pengambilan data hasil perancangan alat yang kemudian digunakan untuk analisis

BAB VI : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari perancangan dan pembangunan alat serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter

Konversi daya dari DC ke AC disebut dengan inverter. Fungsi dari inverter merupakan konverter tegangan arus searah menjadi tegangan arus bolak-balik. Masukan dari inverter dapat berasal dari baterai, panel surya, atau sumber DC lainnya.

Inverter secara luas digunakan pada aplikasi industri seperti pada peralatan *variable speed drive* (VSD) ataupun pada *uninterruptible power supply* (UPS). Macam-macam keluaran dari keluaran inverter adalah 120 V pada frekuensi 60 Hz, 220 V pada frekuensi 50 Hz, dan 115 pada 400 Hz.

Menurut hasil keluaran inverter satu fasa terbagi atas tiga jenis yaitu :

1. *Square Wave Inverter*

Inverter jenis ini didapat dari metode yang paling mudah dalam hal penyaklaran dibandingkan dengan metode lainnya. Tetapi kemudahan tersebut berbanding terbalik dengan hasil keluarannya yang dapat berbahaya bagi peralatan elektronik. Hal ini dikarenakan keluaran dari Square Wave Inverter memiliki nilai harmonisa yang tinggi.

2. *Modified Sine Wave Inverter*

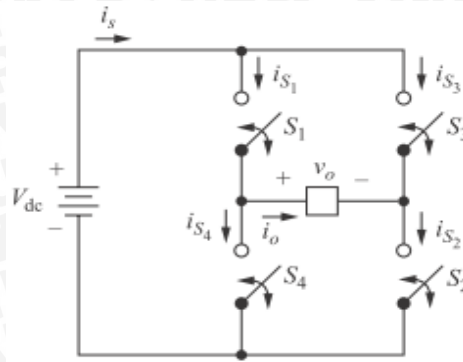
Karakteristiknya mirip dengan Square Wave Inverter dengan grafik keluarannya yang lebih baik. Tetapi jenis inverter ini jika digunakan pada beberapa peralatan elektronik dapat menghasilkan *noise*.

3. *Sine Wave Inverter*

Hasil keluaran dari inverter mirip dengan yang kita peroleh dari PLN. Memiliki kandungan harmonisa yang minim sehingga baik digunakan pada semua perangkat elektronik. Hasil keluaran berupa sinusoidal sehingga nilai harmonisa lebih kecil dibandingkan dengan inverter jenis lainnya.

2.1.1 Prinsip kerja *full bridge inverter*

Konverter yang digunakan untuk menghasilkan tegangan AC 1 fasa dari sumber DC dengan menggunakan rangkaian *full bridge inverter*.



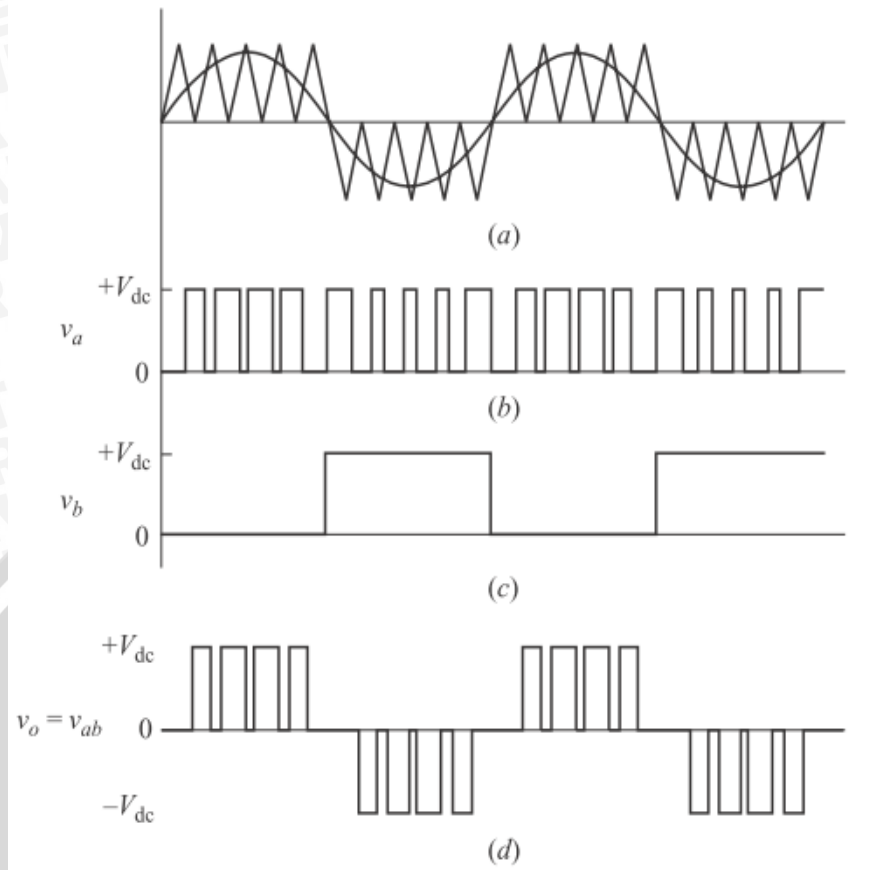
Gambar 2.1 Full bridge inverter

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 332)

Ketika saklar S_1 dan S_2 dinyalakan secara bersamaan, tegangan masukan $+V_{dc}$ akan dirasakan oleh beban. Sedangkan pada saat saklar S_3 dan S_4 dinyalakan secara bersamaan, maka tegangan yang dirasakan beban akan berlawanan polaritas terhadap tegangan pada saat saklar S_1 dan S_2 dinyalakan, yaitu sebesar $-V_{dc}$. Ketika saklar S_1 dengan S_4 dinyalakan, maka saklar S_3 dengan S_2 padam, dan ketika saklar S_3 dan S_2 dinyalakan, maka saklar S_1 dan S_4 padam. Jika hal tersebut tidak terpenuhi, maka akan timbul hubungan arus pendek yang dapat merusak rangkaian *full bridge* inverter.

2.1.2 SPWM unipolar switching

Terdapat beberapa metode switching pada *full bridge* inverter. Metode SPWM *unipolar switching* menawarkan salah satu cara untuk meminimalisir nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) pada beban. Hasil pembentukan sinyal *switching* berasal dari hasil komparasi antara sinyal sinusoida dan segitiga seperti gambar dibawah ini



Gambar 2.2 SPWM dengan metode *unipolar*

(a) Sinyal referensi & *carrier* (b) v_a (c) v_b (d) Tegangan keluaran.

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 360)

Metode pembentukan sinyal SPWM *unipolar switching* membutuhkan dua sinyal yaitu sinyal referensi yang berbentuk sinyal sinusoida dan sinyal *carrier* yang berbentuk sinyal segitiga. Ketika nilai dari sinyal referensi sinusoida lebih tinggi daripada sinyal pembawa segitiga, maka S_1 aktif ($V_{sine} > V_{tri} = S_1$ aktif). Jika sinyal referensi sinusoida lebih rendah daripada sinyal pembawa segitiga maka S_4 aktif ($V_{sine} < V_{tri} = S_4$ aktif). Sedangkan S_2 dan S_3 bekerja pada frekuensi rendah karena S_2 aktif ketika $V_{sine} > 0$, sedangkan S_3 aktif ketika $V_{sine} < 0$. Dinamakan *unipolar* karena sinyal keluaran bernilai dua yaitu positif atau negatif dari *supply* tegangan DC. Parameter penting pada metode SPWM *unipolar switching* (Daniel W. Hart, 2010:360) :

1. Modulasi frekuensi (m_f)

$$m_f = \frac{f_c}{f_{sine}} \quad (2-1)$$

Peningkatan nilai m_f dengan cara menaikkan frekuensi sinyal pembawa segitiga, akan menaikkan frekuensi dari harmonisa. Frekuensi harmonisa yang tinggi akan

memudahkan dalam pembuatan filter. Hanya dengan *low pass filter*, harmonisa yang berada pada frekuensi tinggi dapat diredam.

2. Modulasi amplitudo (m_a)

$$m_a = \frac{V_m \text{ sine}}{V_m \text{ tri}} \quad (2-2)$$

Modulasi amplitudo adalah rasio dari amplitudo sinyal referensi terhadap sinyal *carrier*. Jika nilai $m_a \leq 1$, maka nilai dari tegangan keluaran sebanding terhadap m_a ($V_{out} = m_a \cdot V_{dc}$). Jika m_a lebih besar dari 1, maka tegangan amplitudo keluaran akan naik, tetapi tidak sebanding dengan m_a .

Teknik modulasi ini menghasilkan banyak pulsa yang memiliki nilai *duty cycle* yang berbeda-beda. Untuk mengetahui nilai tegangan rms pada sisi keluaran rangkaian *full bridge inverter* menggunakan rumus :

$$V_o = V_s \sqrt{\sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi}} \quad (2-3)$$

dengan :

V_s = Tegangan sumber *full bridge inverter*

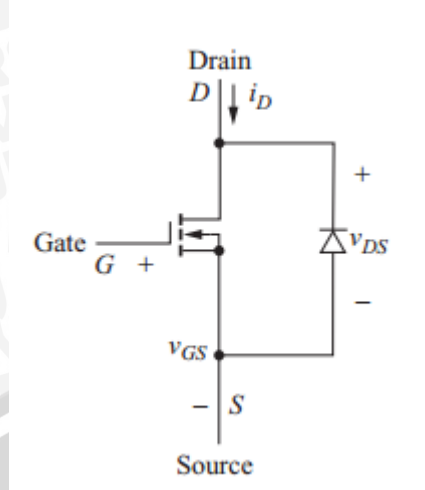
p = $\frac{f_c}{2f_o}$

δ = Nilai *duty cycle*

V_o = Tegangan keluaran *full bridge inverter*

2.2 MOSFET

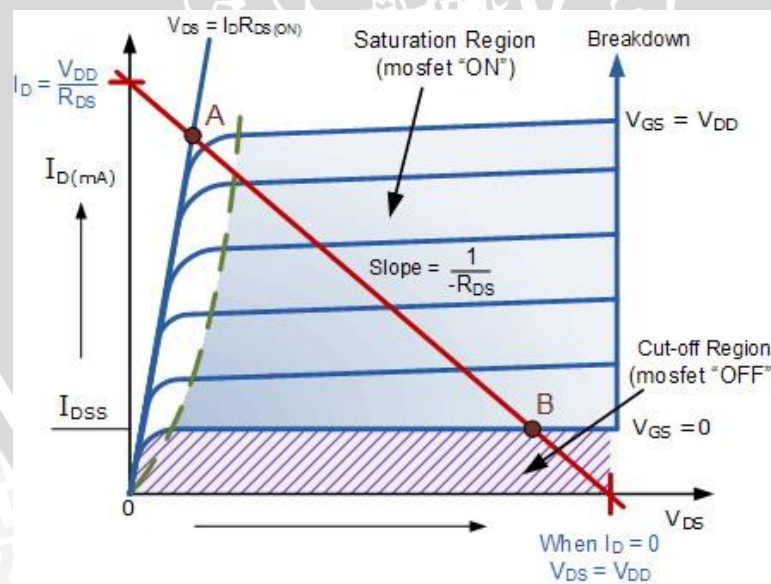
MOSFET merupakan salah satu jenis transistor yang memiliki impedansi masukan (*gate*) sangat tinggi sehingga saat MOSFET difungsikan sebagai saklar elektronik, memungkinkan untuk menghubungkannya dengan berbagai macam mikrokontroller. MOSFET memiliki elektroda pengontrol, yang disebut dengan *gate*, yang dapat mengatur konduktansi suatu kanal di permukaan yang menghubungkan 2 kontak yang disebut *drain* dan *source*. Pada *full bridge converter*, MOSFET berfungsi sebagai saklar sehingga pada kondisi saturasi (on) dan kondisi *cut-off* (off) yang digunakan.



Gambar 2.3 MOSFET kanal N dengan dioda balik

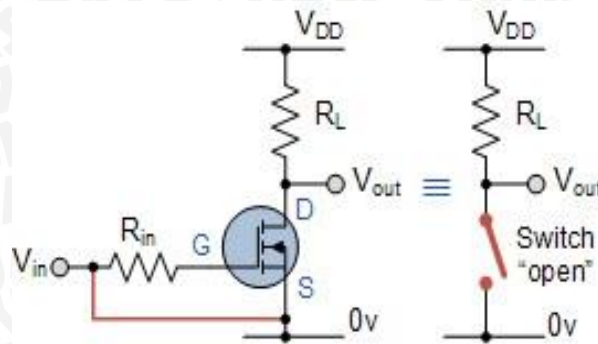
Sumber: Daniel W. Hart (2011: 360)

Pada daerah *cut-off* MOSFET tidak mendapatkan tegangan input ($V_{in} = 0\text{ V}$) sehingga tidak ada arus drain I_D yang mengalir. Kondisi ini akan membuat tegangan $V_{DS} = V_{DD}$. Dengan beberapa kondisi diatas maka pada daerah *cut-off* ini MOSFET dikatakan off. Kondisi *cut-off* ini dapat diperoleh dengan menghubungkan jalur input (*gate*) ke ground, sehingga tidak ada tegangan input yang masuk ke rangkaian saklar MOSFET.



Gambar 2.4 Kurva karakteristik MOSFET

Sumber: Agus Purnama (2012: 1)



Gambar 2.5 Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah *cut off*

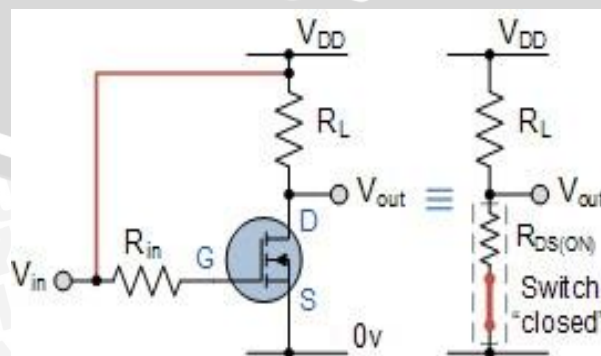
Sumber: Agus Purnama (2012: 1)

Karakteristik MOSFET pada daerah cut-off antara lain:

1. Input *gate* tidak mendapat tegangan bias karena terhubung ke ground (0 V).
2. Tegangan gate lebih rendah dari tegangan treshold ($V_{GS} < V_{th}$).
3. MOSFET off total pada daerah cut-off ini.
4. Tidak arus drain yang mengalir pada MOSFET.
5. Tegangan output $V_{out} = V_{DS} = V_{DD}$.
6. MOSFET dianalogikan sebagai saklar kondisi terbuka.

Dengan beberapa karakteristik diatas maka dapat dikatakan bahwa MOSFET pada daerah cut-off merupakan saklar terbuka dengan arus drain $I_D = 0$ A. Untuk mendapatkan kondisi MOSFET dalam keadaan open maka tegangan gate V_{GS} harus lebih rendah dari tegangan *treshold* dengan cara menghubungkan terminal picu (*gate*) ke *ground*.

Pada daerah saturasi MOSFET mendapatkan bias input (V_{GS}) secara maksimum sehingga arus drain pada MOSFET juga akan maksimum dan membuat tegangan $V_{DS} = 0$ V. Pada kondisi saturasi ini MOSFET dapat dikatakan dalam kondisi on secara penuh.



Gambar 2.6 Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah saturasi

Sumber: Agus Purnama (2012: 1)

Karakteristik MOSFET pada daerah saturasi antara lain:

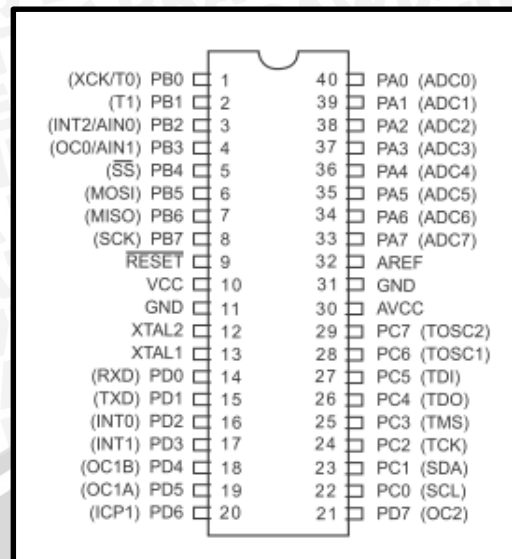
1. Tegangan input gate (V_{GS}) tinggi.
2. Tegangan input gate (V_{GS}) lebih tinggi dari tegangan treshold ($V_{GS} > V_{TH}$).
3. MOSFET konduksi (fully-on) pada daerah saturasi.
4. Tegangan drain dan source ideal (V_{DS}) pada daerah saturasi adalah 0 V.
5. Resistansi drain dan source sangat rendah ($R_{DS} < 0,1 \Omega$).
6. Tegangan output $V_{out} = V_{DS} = 0,2 \text{ V}$ ($R_{DS} \cdot I_D$)
7. MOSFET dianalogikan sebagai saklar kondisi tertutup.

Kondisi saturasi MOSFET diperoleh dengan memberikan tegangan input gate yang lebih tinggi dari tegangan *treshold*-nya dengan cara menghubungkan terminal input ke V_{DD} . Sehingga MOSFET menjadi saturasi dan dapat dianalogikan sebagai saklar tertutup.

2.3 Mikrokontroler ATmega16

Mikrokontroler termasuk perangkat yang didesain dalam bentuk chip tunggal. Mikrokontroler didesain dengan instruksi-instruksi yang lebih luas dan 8 bit instruksi yang digunakan membaca dan data instruksi dari internal memori ke Arithmetic and Logical Unit (ALU). Sebuah sistem mikrokontroler ATmega16 bila dibandingkan dengan mikroprosesor memiliki kemampuan dan dari segi ekonomis yang bisa diandalkan karena pada mikrokontroler sudah terdapat RAM dan ROM sedangkan pada mikroprosesor tidak ada. Fitur yang dimiliki oleh ATmega16 adalah :

- Memiliki memori baca dan tulis sebesar 1 kbyte SRAM
- Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu Port A, Port B, Port C, dan Port D.
- Mampu beroperasi hingga 16MHz.
- Tersedia *Analog to Digital Converter* (ADC) 10-bit dan *Analog Comparator* di dalam *chip*.
- CPU yang terdiri atas 32 buah register.
- Unit interupsi internal dan eksternal.
- Port USART untuk komunikasi serial.
- Dua buah *Timer/Counter* 8 bit dengan Prescaler terpisah dan Mode *Compare*.
- Satu buah *Timer/Counter* 16 bit dengan Prescaler terpisah, Mode *Compare*, dan Mode *Capture*.



Gambar 2.7 Pin ATmega16

Sumber: Datasheet Atmel (2010: 2)

Fungsi kaki-kaki ATmega16 adalah :

- *Port A* (Pin A0...7), berfungsi sebagai input analog pada konverter A/D. *Port A* juga sebagai suatu port I/O 8-bit dua arah. Fungsi khusus *Port A* adalah sebagai ADC.
- *Port B* (Pin B0....7), merupakan saluran masukan/keluaran dua arah dan pada beberapa pin memiliki fungsi khusus. Diantaranya *Port B0* (T0 (*timer/counter0* eksternal *counter input*) & XCK (USART eksternal *clockinput/output*), *Port B1* (T1 (*timer/counter* eksternal *counter input*)).
- *Port C* (Pin C0....7), merupakan saluran masukan/keluaran dua arah dan pada beberapa pin memiliki fungsi khusus. Diantaranya *Port C6* (TOSC1 (*Timer oscillator* pin1)), *Port C7* (TOSC2 (*Timer oscillator* pin2)).
- *Port D* (Pin D0....7), merupakan saluran masukan/keluaran dua arah dan pada beberapa pin memiliki fungsi khusus. Diantaranya *Port D0* (RXD (USART *input* pin)), *Port D1* (TXD (USART *output* pin)), *Port D4* (OC1B (*Timer/counter 1 output compare B match output*)), *Port D5* (OC1A (*Timer/counter 1 output compare A match output*)).

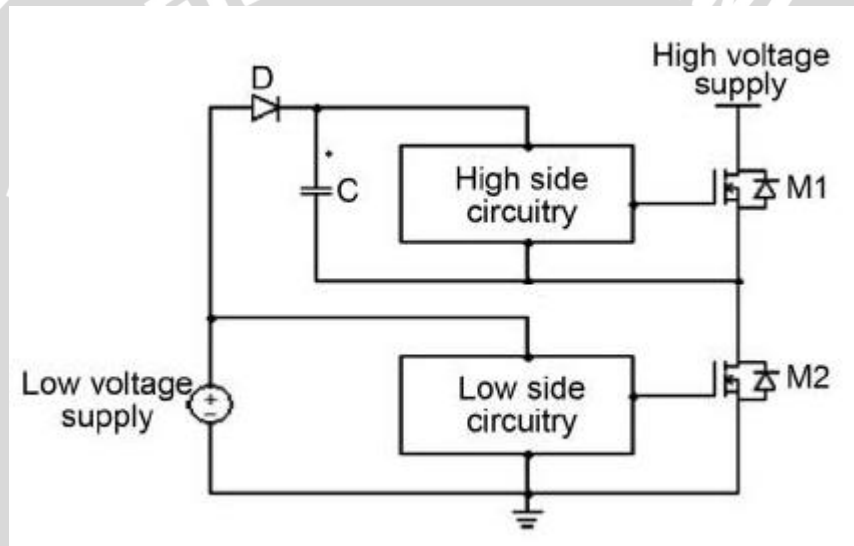
2.4 Driver MOSFET

Syarat agar MOSFET tipe N agar dapat *saturasi* yaitu tegangan *gate* harus lebih positif dari tegangan *source*. Tetapi permasalahan terjadi apabila MOSFET kanal N yang terletak pada *high side*, ketika *drain* dari MOSFET terhubung dengan sumber tegangan

tinggi, MOSFET dapat *saturasi* memerlukan tegangan *gate* harus lebih positif dari tegangan *source*.

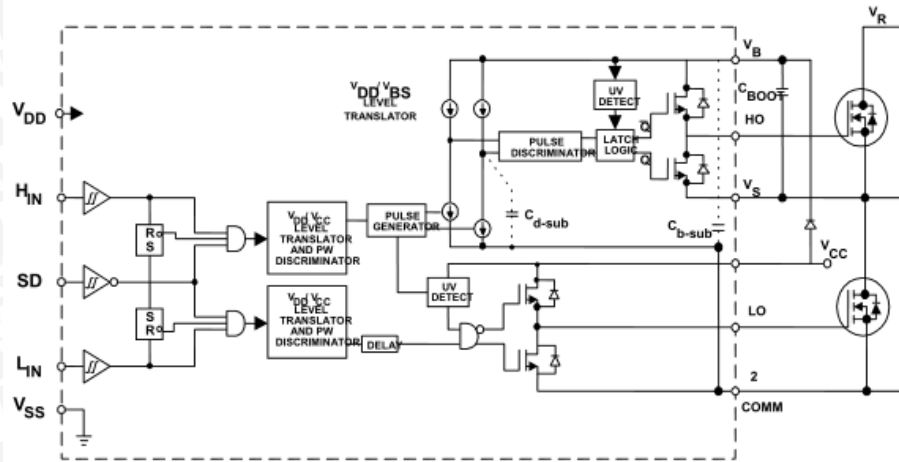
Pada perkembangan teknologi saat ini terdapat IC *driver gate* untuk MOSFET. Metode yang digunakan adalah dengan metode *bootstrap* yang rangkaiannya terdiri atas dioda dan kapasitor sesuai pada gambar 2.8. Sedangkan kriteria yang harus dicapai oleh *driver* MOSFET diantaranya :

1. Tegangan *gate* harus 10V sampai 15V atau lebih dari tegangan *source*.
2. Tegangan *gate* dapat dikontrol dengan referensi *ground*.
3. Daya yang diserap rangkaian *gate drive* tidak terlalu mempengaruhi efisiensi sistem.



Gambar 2.8 Metode bootstrap untuk menghasilkan tegangan ambang
Sumber: M. Rashid (1988 : 105)

Salah satu pengembang teknologi IC *gate driver* ini adalah dari *International Rectifier*. Metode yang digunakan adalah dengan metode *bootstrap* yang terintegrasi dengan *level shifting* yang memiliki nilai tegangan ambang mencapai 600 dan 1200V. Dengan menggunakan rangkaian *bootstrap*, maka frekuensi *switching* dapat diatur dari puluhan sampai ratusan hertz. Blok diagram pada IC IR2110 tersaji pada gambar dibawah.



Gambar 2.9 Blok diagram IR2110
 Sumber: Application note 978 – 3

Untuk menentukan nilai minimal kapasitor *bootstrap* telah dicantumkan pada *application note driver* MOSFET IR2110 yang dihitung dengan persamaan (Jim Doucet, 2007:28)

$$Q_{bs} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \quad (2-4)$$

dimana :

Q_g = Gate charge high side MOSFET

$I_{qbs(max)}$ = Quiescent current for the high side driver

f = Frekuensi switching terendah saat penggunaan

Q_{ls} = Level shift required per cycle

$I_{cbs(leak)}$ = Bootstrap capacitor leakage current

Untuk menghitung nilai kapasitor *bootstrap* diperoleh dengan cara :

$$C \geq \frac{2 \times Q_{bs}}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \quad (2-5)$$

dimana :

V_f = Drop tegangan pada saat diode *bootstrap* konduksi

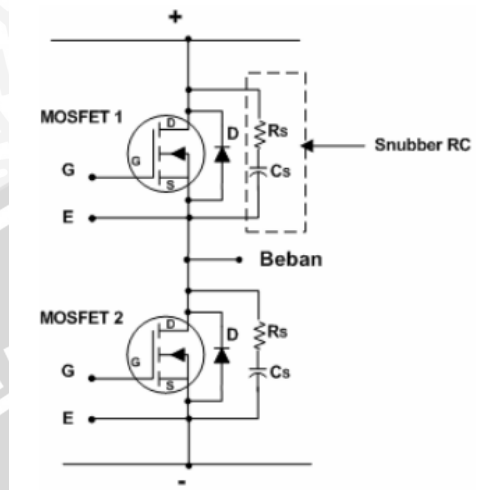
V_{LS} = Drop tegangan pada MOSFET

V_{min} = Tegangan *threshold* MOSFET

2.5 Snubber

Pada operasi *switching* inverter, MOSFET membutuhkan rangkaian pelindung yang bernama *snubber*. Rangkaian *snubber* berfungsi untuk menekan kondisi yang timbul dari

hasil *switching* MOSFET yang tidak diinginkan. Pada saat berubah dari keadaan saturasi menuju *off* maupun sebaliknya, terjadi kondisi dimana nilai tegangan pada MOSFET yang tinggi (*spike*) walaupun hanya sesaat. Konfigurasi *snubber* pada MOSFET :



Gambar 2.10 Konfigurasi *snubber*

Sumber: Sardiyanto (2011 : 2)

Perhitungan untuk mendapatkan nilai kapasitor dan resistor *snubber* (Lexi Yustisia, 2011:59) :

$$C_s = \frac{I_L \times t_f}{2 \times V_f} \quad (2-6)$$

dimana :

I_L = Arus pada beban (maksimum)

t_f = *fall time* MOSFET

V_f = Tegangan sumber

Nilai R_s diperoleh dari :

$$R_s < \frac{t_{on}}{5 \times C} \quad (2-7)$$

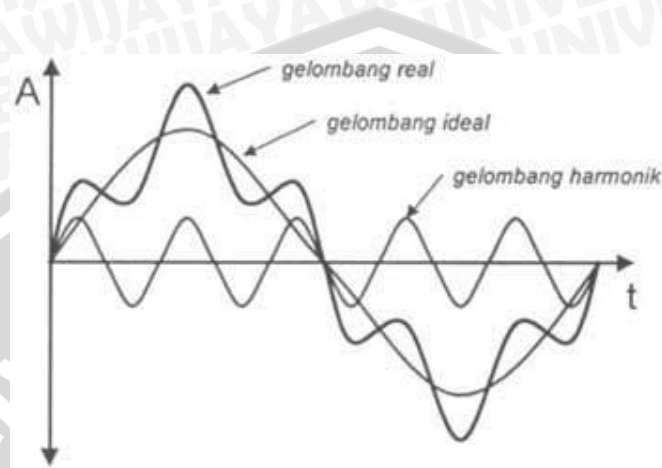
dimana:

t_{on} = Waktu *on* pada MOSFET

2.6 Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi akibat distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi disebabkan oleh adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan

frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamental. Bilangan bulat pengali pada frekuensi harmonisa adalah orde- n dari harmonisa tersebut. Penjumlahan distorsi dari bentuk gelombang harmonisa ke- n dengan gelombang dasar, maka bentuk gelombang tegangan ataupun arus akan terdistorsi, sehingga akan terbentuk gelombang sinusoida terdistorsi.



Gambar 2.11 Gelombang fundamental dan harmonisa

Sumber: Agus Purnama (2012 : 1)

Dampak yang ditimbulkan oleh harmonisa adalah terdapat rugi-rugi pada peralatan listrik yang dapat menyebabkan peralatan listrik tidak berfungsi normal. Efek yang timbul pada peralatan listrik ketika diberi sumber tegangan terdistorsi adalah :

1. Pada *Compact Fluorescent Lamp* (CFL) ketika diberi sumber tegangan sinusoida terdistorsi hanya terdengar suara yang muncul saja dan tidak ada efek samping lainnya.
2. Pada lampu pijar atau bohlam akan mengurangi umur pemakaian lampu. Karena jenis lampu ini memiliki sifat yang sensitif terhadap tingkat tegangan sumber. Hal ini dikarenakan suhu filamen menjadi tinggi ketika diberi sumber tegangan sinusoida terdistorsi dan secara tidak langsung akan mengurangi umur pemakaian lampu.
3. Pada televisi, harmonisa akan mempengaruhi nilai puncak tegangan yang berdampak pada perubahan ukuran gambar dan tingkat kecerahan pada televisi.
4. Dapat menyebabkan terjadinya kesalahan pada alat ukur.
5. Jika tegangan yang terdistorsi dihubungkan pada motor, harmonisa akan menimbulkan panas tambahan sehingga menambah rugi-rugi tembaga dan besi. Hal ini akan mempengaruhi efisiensi dari motor itu sendiri.

Sedangkan *Total Harmonic Distortion* (THD) adalah nilai rms harmonisa di atas frekuensi fundamentalnya dibagi dengan nilai rms fundamentalnya. THD memberikan informasi tentang konten harmonisa total, tetapi tidak mengindikasikan level masing-masing komponen harmonisa. Persamaan THD terdapat pada tegangan dan arus dengan perhitungan yang sama jika mencari THD_v maka besaran yang dimasukan berupa tegangan rms jika THD_i dalam besaran arus dengan rumus (Daniel W. Hart, 2010:339) :

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2-8)$$

dimana :

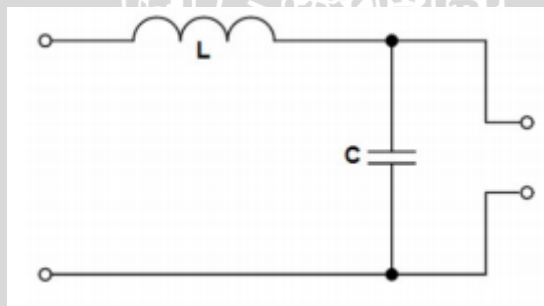
THD_v = *Total Harmonic Distortion* pada tegangan

V_n = Tegangan rms orde ke-n

V_1 = Tegangan rms fundamental

2.7 *Low pass filter* LC

Low pass filter adalah suatu rangkaian yang meneruskan sinyal-sinyal yang memiliki frekuensi dibawah frekuensi resonansinya, dan meredam sinyal yang memiliki frekuensi diatas frekuensi resonansinya. Filter pasif memiliki kelebihan yaitu dapat diaplikasikan pada rangkaian yang memiliki daya besar. Jika dibandingkan dengan filter aktif yang memerlukan opamp pada perancangannya yang mana tidak tersedia di pasaran opamp dengan rating daya yang tinggi. Susunan filter tersaji pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rangkaian *low pass filter* LC

Sumber: Khaled H. Ahmed (2007 : 50)

Akan tetapi filter pasif memiliki kekurangan yaitu cukup rumit dalam hal perhitungan dan aplikasinya. Filter pasif memiliki ciri yaitu memiliki nilai resistansi yang cukup tinggi pada frekuensi *switching* rendah (karena membutuhkan nilai induktansi yang besar, sehingga membutuhkan konduktor yang panjang), sehingga solusinya yaitu dengan cara menaikkan frekuensi *switching* MOSFET. Akan tetapi masalah baru muncul yaitu MOSFET memiliki rugi-rugi yang lebih besar akibat dari frekuensi *switching* yang tinggi.

Sehingga perlu nilai filter yang pas untuk dapat meredam sinyal harmonisa yang tidak diinginkan. Untuk mencari nilai frekuensi *cut off* (Khaled H. Ahmed, 2007:50) :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-9)$$

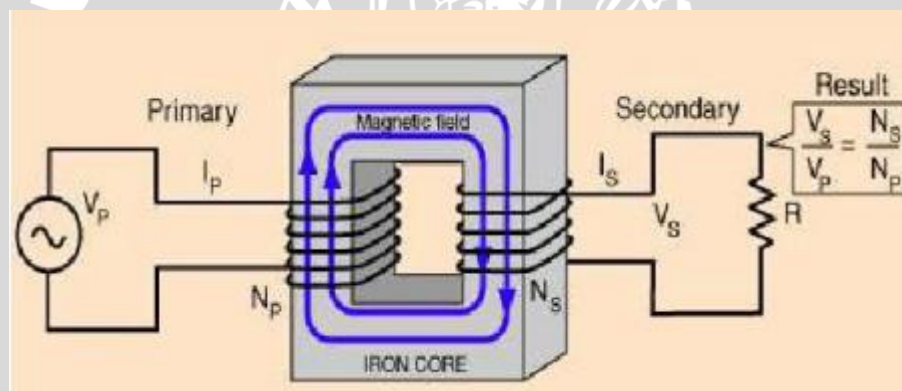
dimana :

L = Induktansi filter.

C = Kapasitansi filter.

2.8 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai pemisah satu rangkaian terhadap rangkaian lainnya.



Gambar 2.13 Transformator

Sumber: Lexi Yustisia (2011 : 47)

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Apabila pada kumparan primer transformator dihubungkan dengan tegangan V_p berbentuk sinusoida, maka akan mengalir arus primer I_p yang juga berbentuk sinusoida. Dengan menganggap belitan primer N_p relatif murni, I_p akan tertinggal 90° dari V_p .

Nilai resistansi dan induktansi dan transformator dapat ditentukan nilainya dengan pengujian. Untuk mengetahui nilai R_c dan X_m pada transformator dapat dilakukan dengan pengujian transformator hubung buka (*open circuit*), dan untuk mengetahui nilai dari R_{eq} dan X_{eq} dengan cara pengujian pada hubung singkat (*short circuit*). Perhitungan pada

pengujian hubung buka (P. C. Sen, 1996:57) :

$$P_{oc} = V_{oc} \times I_{oc} \times \cos \theta \quad (2-10)$$

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle \theta \text{ (Faktor daya transformator lagging)} \quad (2-11)$$

$$Y_E = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m} \quad (2-12)$$

dimana :

P_{oc} = Daya *open circuit*

V_{oc} = Tegangan *open circuit*

I_{oc} = Arus *open circuit*

R_c = Resistansi pemagnetan

X_m = Reaktansi pemagnetan

Sedangkan perhitungan pada percobaan hubung singkat :

$$P_{sc} = V_{sc} \times I_{sc} \times \cos \theta \quad (2-13)$$

$$Z_{eq1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta = R_{eq1} + jX_{eq1} \quad (2-14)$$

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} \quad (2-15)$$

dimana :

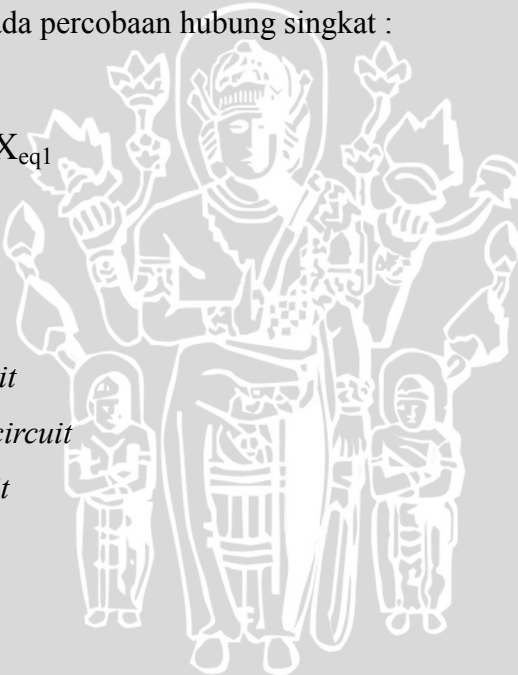
P_{sc} = Daya *short circuit*

V_{sc} = Tegangan *short circuit*

I_{sc} = Arus *short circuit*

R_{eq1} = Resistansi seri

X_{eq1} = Reaktansi seri



BAB III

METODE PENELITIAN

Kajian yang dilakukan dalam skripsi adalah perancangan inverter satu fasa sinusoidal untuk beban rumah tangga. Metode yang digunakan untuk merealisasikan alat tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian

3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan dasar tentang segala sesuatu yang mendukung perancangan serta pembuatan alat ini. Pembuatan alat ini menggunakan referensi dari buku-buku maupun artikel dari internet agar mengetahui prinsip kerja, karakteristik komponen, serta teori yang menunjang lainnya.

3.2 Perancangan alat

Tahapan yang dilalui pada perancangan inverter satu fasa sinusoidal untuk beban rumah tangga meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan diagram balok sistem keseluruhan.

Mekanisme pembuatan alat menjadi lebih mudah dengan bantuan diagram

balok. Diagram balok merupakan penggambaran suatu sistem yang setiap balok mewakili fungsi berbeda-beda. Diagram balok dapat memudahkan dalam menganalisa dan merancang sistem yang akan dibuat.

2. Penentuan spesifikasi tiap balok.

Tahap ini berfungsi untuk mengetahui spesifikasi alat yang digunakan pada tiap balok dan kegunaan tiap balok terhadap sistem keseluruhan.

3. Perancangan perangkat keras.

Setelah menentukan spesifikasi per-balok, hal yang selanjutnya dilakukan adalah menentukan *rating* dari komponen yang digunakan pada tiap balok tersebut berdasarkan perhitungan terlebih dahulu. Setelah menentukan *rating* tiap komponen, cek ketersediaan di pasaran mengenai komponen yang memiliki *rating* tersebut. Jika terdapat alat yang tidak sesuai dengan hasil perhitungan, maka perlu penyesuaian perhitungan sesuai dengan ketersediaan komponen.

4. Perancangan perangkat lunak.

Pembuatan perangkat lunak dilakukan dengan menggunakan bahasa C dengan bantuan software CVAVR. Desain dari perangkat lunak akan diterapkan kedalam mikrokontroler ATmega16.

3.3 Simulasi

Sebelum melakukan pembuatan alat, kita membutuhkan simulasi guna memperkecil kemungkinan kegagalan. *Software* yang digunakan adalah PSIM untuk pembuatan *switching* pada MOSFET dengan menggunakan *look up table*, rangkaian *full bridge* inverter, dan penentuan nilai *low pass* filter.

3.4 Pengujian alat

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dan kesesuaian dengan perancangan maka dilakukan pengujian rangkaian. Pengujian dilakukan pada masing masing balok maupun keseluruhan sistem.

3.5 Pengambilan kesimpulan dan saran

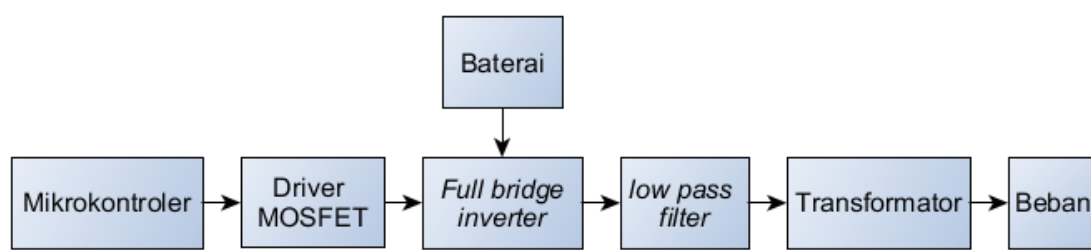
Pengambilan kesimpulan dilakukan setelah mendapatkan hasil dari pengujian. Kekurangan yang ada pada alat dapat menjadi saran agar kedepannya dapat menjadi penelitian lebih lanjut.

BAB IV PERANCANGAN DAN SIMULASI

Perancangan dan pembuatan alat ini terdiri atas dua bagian yaitu perancangan dan pembuatan perangkat keras serta perancangan dan pembuatan perangkat lunak. Perancangan dan pembuatan alat dilakukan bertahap sesuai dengan diagram balok.

4.1 Perancangan sistem

Diagram balok pada perancangan inverter satu fasa sinusoidal untuk beban rumah tangga sebagai berikut :



Gambar 4.1 Diagram balok sistem inverter satu fasa sinusoidal

Pembangkitan sinyal *switching* yang dihasilkan melalui mikrokontroler akan digunakan untuk mengatur penyaklaran pada masing-masing gate MOSFET pada rangkaian *full bridge* inverter. Pembangkitan sinyal pada metode SPWM *unipolar switching* berasal dari hasil komparasi dari sinyal sinuoidal dengan sinyal segitiga. Proses komparasi kedua sinyal tersebut didapat dari hasil simulasi dengan menggunakan *software simulator* PSIM. Data dari simulasi nantinya akan menjadi sinyal *switching* pada mikrokontroler dengan proses pembangkitannya dilakukan dengan cara *look up table*.

Proses pemberian sinyal *switching* pada rangkaian *full bridge* inverter harus melewati *driver* MOSFET terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan MOSFET bekerja pada sisi *high side* dan *low side*. Prinsip kerja MOSFET agar saturasi (on) yaitu tegangan $V_{GS} > V_{DS}$, sehingga diperlukan tegangan ambang yang nilainya lebih tinggi dari sumber pada MOSFET *high side*.

Setelah melalui proses pembentukan sinyal SPWM *unipolar switching*, proses selanjutnya adalah meredam harmonisa yang dihasilkan oleh *switching* dari semikonduktor agar terbentuk sinyal output berbentuk sinusoidal dengan dilewatkan pada rangkaian *low pass filter* LC. Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang dibutuhkan oleh beban rumah tangga yang mana di Indonesia menetapkan tegangan sebesar 220 volt,

hasil keluaran dari filter dinaikkan tegangannya sesuai kebutuhan tersebut dengan transformator *step up* dan nilai tegangan keluaran dijaga agar tidak kurang dari 220 V dengan pengaturan nilai m_a pada mikrokontroler.

4.2 Perancangan spesifikasi tiap balok

Sumber tegangan DC pada masukan rangkaian *full bridge* inverter menggunakan baterai jenis VRLA 12V, 5Ah sebanyak 2 buah yang terhubung secara seri. Pada perancangan ini, inverter satu fasa sinusoidal dibebani maksimal sebesar 125 watt saja, sehingga jenis MOSFET dipilih yang memiliki *rating* arus sampai lebih dari 10 A.

Untuk menghasilkan *switching* pada rangkaian *full bridge* inverter, kontroler yang digunakan adalah ATmega16 karena mudah didapat. Karena *rating* arus pada sisi masukan transformer mencapai lebih dari 10 A, maka *low pass* filter harus mampu untuk memiliki *rating* arus yang lebih besar dari itu. Tentunya hal ini berdampak pada pemilihan besarnya konduktor induktor pada filter. Selanjutnya untuk transformer yang digunakan adalah jenis *low frequency* dan dioperasikan sebagai *step up*.

4.3 Perancangan perangkat keras

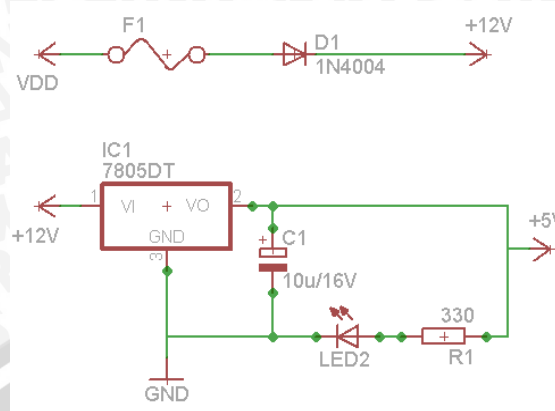
Pada perancangan inverter satu fasa sinusoidal untuk beban rumah tangga terdiri atas beberapa rangkaian utama yang terdiri dari rangkaian catu daya, rangkaian mikrokontroler, rangkaian *full bridge* inverter, *driver* MOSFET, *low pass* filter LC, dan *snubber*.

4.3.1 Rangkaian catu daya

Pada peralatan elektronika, dibutuhkan sumber listrik yang sesuai dengan kapasitasnya agar mampu menjalankan keseluruhan sistem. Pada perancangan ini sumber V_{DC} pada masukan inverter berasal dari baterai jenis VRLA sebanyak dua buah yang dipasang seri. Sedangkan untuk rangkaian mikrokontroler yang digunakan sebagai pembangkit sinyal *switching* pada rangkaian *full bridge* inverter membutuhkan catu daya sebesar 5 volt. Catu daya sebesar 5 volt ini sudah berada pada *range* tegangan kerja dari ATmega16 yang sebesar 4,5 sampai 5,5 volt.

Pada perancangan, catu daya pada mikrokontroler bersumber dari baterai li-po 3 *cell* yang terhubung dengan regulator tegangan dengan jenis LM7805 yang memiliki tegangan keluaran minimal 4,7 volt dan maksimal 5,3 volt dengan tegangan masukannya antara 8 sampai 21 volt dan arus keluaran regulator antara 5 mA sampai 1 mA. Rangkaian catu

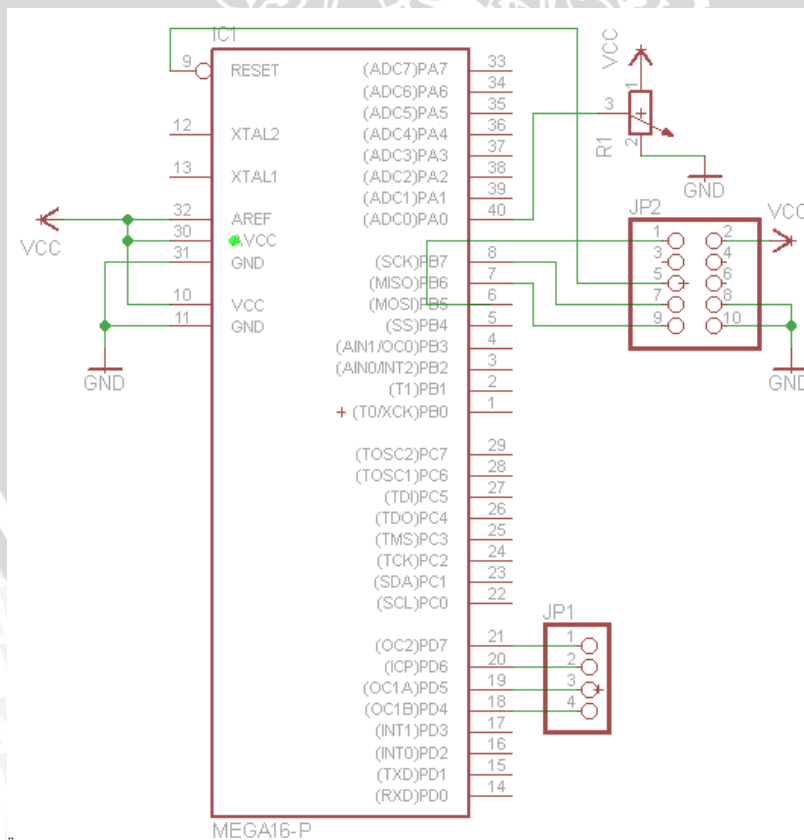
daya seperti gambar berikut :



Gambar 4.2 Rangkaian catu daya

4.3.2 Rangkaian mikrokontroler

Pada perancangan dipilih ATmega16 sebagai mikrokontroler yang menjalankan *switching* pada rangkaian *full bridge* inverter. Konfigurasi kaki I/O dari mikrokontroler ATmega16 sebagai berikut :



Gambar 4.3 Rangkaian mikrokontroler ATmega16

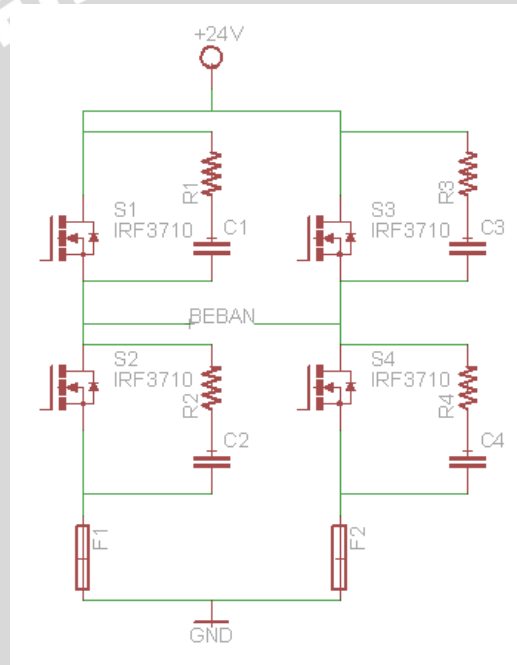
Mikrokontroler ATmega16 memiliki kaki sebanyak 40 pin, 32 diantaranya dapat

deprogram menjadi masukan ataupun keluaran. Pada perancangan ini pin-pin yang digunakan :

- PORTD.4 : SPWM *pulse trigger* saklar S₁
- PORTD.5 : SPWM *pulse trigger* saklar S₃
- PORTD.6 : SPWM *pulse trigger* saklar S₂
- PORTD.7 : SPWM *pulse trigger* saklar S₄
- PORTA.0 : Pengaturan nilai m_a

4.3.3 Rangkaian *full bridge* inverter

Rangkaian *full bridge* inverter memiliki 4 buah saklar yang susunannya ditunjukkan dalam gambar :



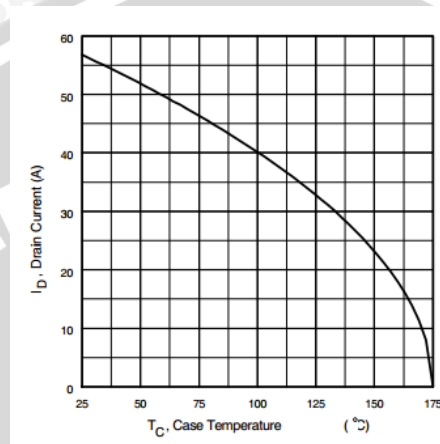
Gambar 4.4 Rangkaian *full bridge* inverter

Terdapat beragam jenis MOSFET yang beredar di pasaran. Pada perancangan ini MOSFET yang digunakan adalah IRF3710 dengan spesifikasi sebagai berikut :

- $V_{DS\ max}$ = 100V
- $R_{DS\ on}$ = 23 m Ω
- $I_{D\ mac}$ (Tc=25⁰C) = 57A
- $V_{GS\ threshold}$ = 2V – 4V

Alasan pemilihan IRF3710 sebagai komponen yang digunakan pada rangkaian *full bridge* inverter karena tegangan sumber yang digunakan hanya sebesar 24V. MOSFET nantinya

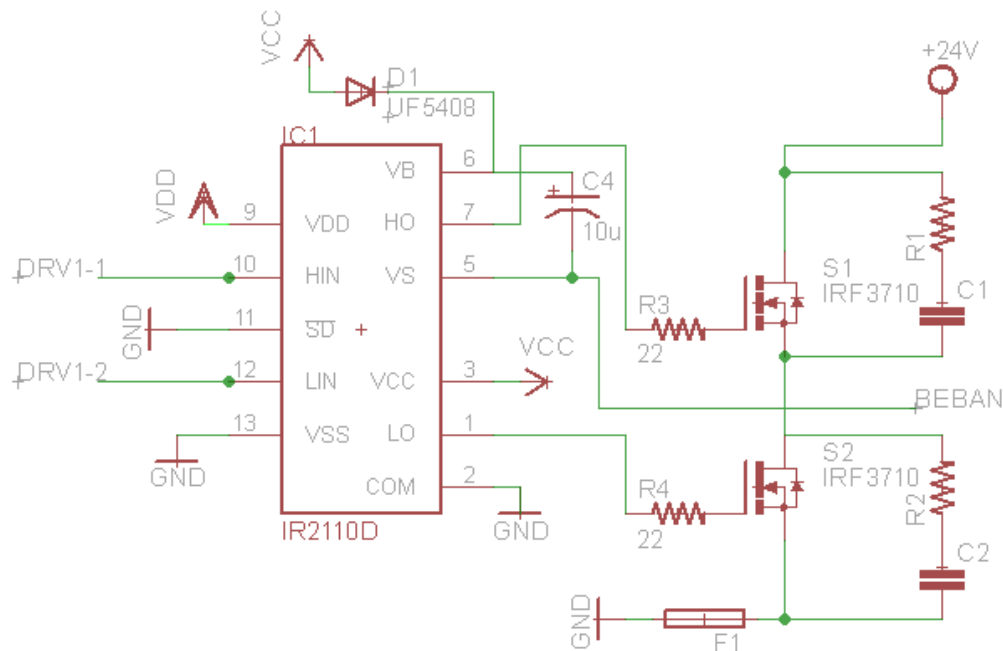
akan dioperasikan pada frekuensi yang cukup tinggi, sehingga nilai $R_{DS\ on}$ sangat mempengaruhi rugi – rugi pada *switching* MOSFET. Nilai $R_{DS\ on}$ pada IRF3710 merupakan yang paling kecil diantara jenis MOSFET kanal N lainnya yang beredar di pasaran. Nilai nominal arus pada perancangan sebesar 12 A dan IRF3710 masih mampu untuk melewati arus. Tetapi MOSFET memiliki karakteristik saat suhu bertambah panas, maka kemampuan MOSFET untuk menghantarkan arus juga ikut berkurang seperti yang terdapat pada *datasheet* IRF3710 pada gambar berikut :



Gambar 4.5 Karakteristik arus terhadap suhu IRF3710

4.3.4 Rangkaian *driver* MOSFET

Untuk mengoperasikan MOSFET pada *full bridge* inverter, tegangan V_{GS} MOSFET pada *low side* sebesar 24V, sedangkan pada *high side* $> 24V$, maka diperlukan *driver* untuk mengoperasikan MOSFET pada kedua sisi tersebut. Dalam perancangan ini digunakan rangkaian *bootstrap* yang terhubung pada IR2110 yang secara integrasi dapat memberi sinyal *switching* baik dari sisi *high side* maupun *low side* dari MOSFET sekaligus dan hanya membutuhkan satu *supply*. Rangkaian IR2110 beserta rangkaian *bootstrap* sebagai berikut :



Gambar 4.6 Rangkaian *driver* MOSFET

Pin VCC diberi tegangan 12V dan pin VDD diberi tegangan 5V. Sedangkan penambahan fuse 15 A dimaksudkan sebagai pengaman hubung singkat pada sisi MOSFET. Komponen dioda dan kapasitor adalah penambahan rangkaian *bootstrap* untuk memberikan *trigger high-side* MOSFET.

Nilai kapasitansi minimum pada rangkaian *bootstrap* yang perhitungannya terdapat pada *datasheet* IR2110 ditentukan berdasarkan nilai minimum *charging* dengan perumusan :

$$Q_{bs} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f}$$

Sesuai dengan spesifikasi pada MOSFET IRF3710 dan *datasheet* pada IR2110 diperoleh :

$$Q_g = 130\text{nC (pada } \textit{datasheet} \textit{ MOSFET)}$$

$$I_{qbs(max)} = 230\mu\text{A (pada } \textit{datasheet} \textit{ IR2110)}$$

$$f = 5\text{kHz}$$

$$Q_{ls} = 5\text{nC (pada } \textit{datasheet} \textit{ IR2110)}$$

$$I_{cbs(leak)} = 250\mu\text{A (pada } \textit{datasheet} \textit{ IR2110)}$$

maka :

$$Q_{bs} = 2 \times 130 \times 10^{-9} + \frac{230 \times 10^{-6}}{5000} + 5 \times 10^{-9} + \frac{250 \times 10^{-6}}{5000}$$

$$Q_{bs} = 26 \times 10^{-8} + 46 \times 10^{-9} + 5 \times 10^{-9} + 5 \times 10^{-8}$$

$$Q_{bs} = 3,6 \times 10^{-7}$$

Untuk menghitung nilai kapasitor *bootstrap* diperoleh dengan cara :

$$C \geq \frac{2 \times Q_{bs}}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}}$$

dengan nilainya :

$$V_{cc} = 12V$$

$$V_f = 1,7V$$

$$V_{LS} = 1,5V$$

$$V_{min} = 2V$$

maka :

$$C \geq \frac{2 \times Q_{bs}}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}}$$

$$C \geq \frac{2 \times 3,6 \times 10^{-7}}{12 - 1,7 - 1,5 - 2}$$

$$C \geq 1\mu F$$

Dari *application note* IR2110 disarankan untuk memilih nilai kapasitor 10 kali lipat dari perhitungan sehingga dipilih nilai kapasitor *bootstrap* sebesar 10 μF .

Dioda yang terhubung langsung dengan kapasitor *bootstrap* harus memiliki tegangan balik yang minimal sama dengan tegangan sumber DC dan harus mampu *fast recovery*.

Sedangkan besar arus dioda minimum :

$$I_f = Q_{bs} \times f$$

$$I_f = 3,6 \times 10^{-7} \times 5000$$

$$I_f = 1,8mA$$

Dipilih dioda UF5408 yang merupakan jenis dioda *fast recovery* dengan waktu pemulihan sebesar 75ns dan arus *rating* sebesar 3A.

4.3.5 Snubber

Rangkaian *snubber* berfungsi untuk menekan kondisi yang timbul dari hasil *switching* MOSFET yang tidak diinginkan. Pada saat berubah dari keadaan saturasi menuju kondisi *cut-off* maupun sebaliknya, terjadi kondisi dimana nilai arus yang berimbas juga pada tegangan pada MOSFET yang tinggi (*spike*) walaupun hanya sesaat. Kebocoran induktansi pada transformer juga turut serta menyumbang *spike* tegangan pada MOSFET. Rangkaian *snubber* yang digunakan pada perancangan ini adalah jenis RC (R_s dan C_s). Nilai C_s diperoleh dari :

$$C_s = \frac{I_L \times t_f}{2 \times V_f}$$

dengan nilainya :

$$I_L = 10 \text{ A}$$

$$t_f = 47 \text{ ns (pada datasheet MOSFET)}$$

$$V_f = 24 \text{ V}$$

maka :

$$C_s = \frac{10 \times 47 \times 10^{-9}}{2 \times 24}$$

$$C_s = 10 \text{ nF}$$

Nilai R_s diperoleh dari :

$$R_s < \frac{t_{on}}{5 \times C}$$

maka :

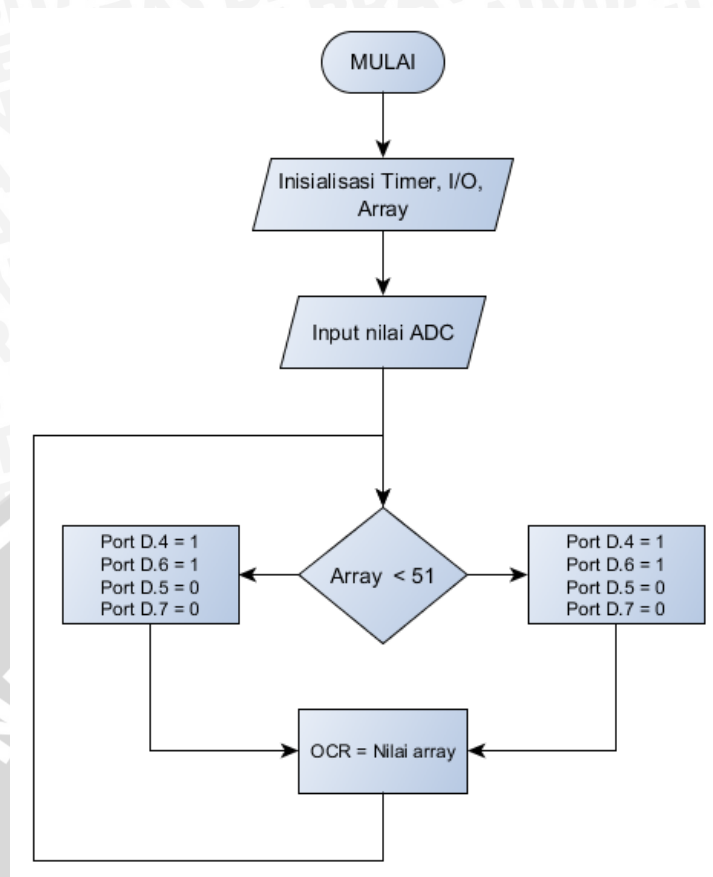
$$R_s < \frac{0,5 \times \frac{1}{5000}}{5 \times 5 \times 10^{-9}}$$

$$R_s < 4\text{k}\Omega$$

Fungsi dari resistor hanya digunakan sebagai pembuang muatan. Ukuran dari resistor diharapkan mampu untuk menyediakan waktu buang dari kapasitor selama MOSFET berada pada kondisi *on* (t_{on}) dan sebelum MOSFET *off* kembali. Dipilih nilai R_s sebesar 3,3k Ω

4.4 Perancangan perangkat lunak

Mikrokontroler merupakan pusat pengolah data dan proses logika. Pada perancangan ini sinyal *switching* pada MOSFET dibangkitkan dengan *look up table*. Hasil dari *look up table* pada tabel 4.2 dimasukkan dalam bentuk *array* pada mikrokontroler. Input ADC digunakan untuk merubah nilai m_a dengan cara perkalian terhadap nilai *array*. *Flowchart* program keseluruhan :



Gambar 4.7 Flowchart program keseluruhan

4.5 Simulasi

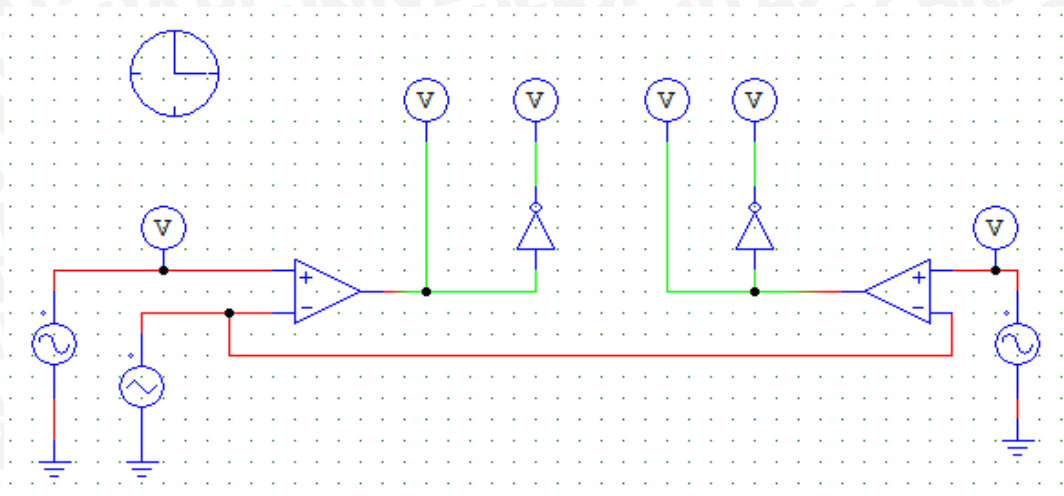
Simulasi digunakan untuk membantu perencanaan alat inverter satu fasa untuk beban rumah tangga dalam hal *switching* MOSFET dengan bantuan *software simulator* PSIM dan untuk simulasi rangkaian *full bridge* inverter beserta *low pass filter* dengan bantuan PSIM

4.5.1 Simulasi *switching* MOSFET

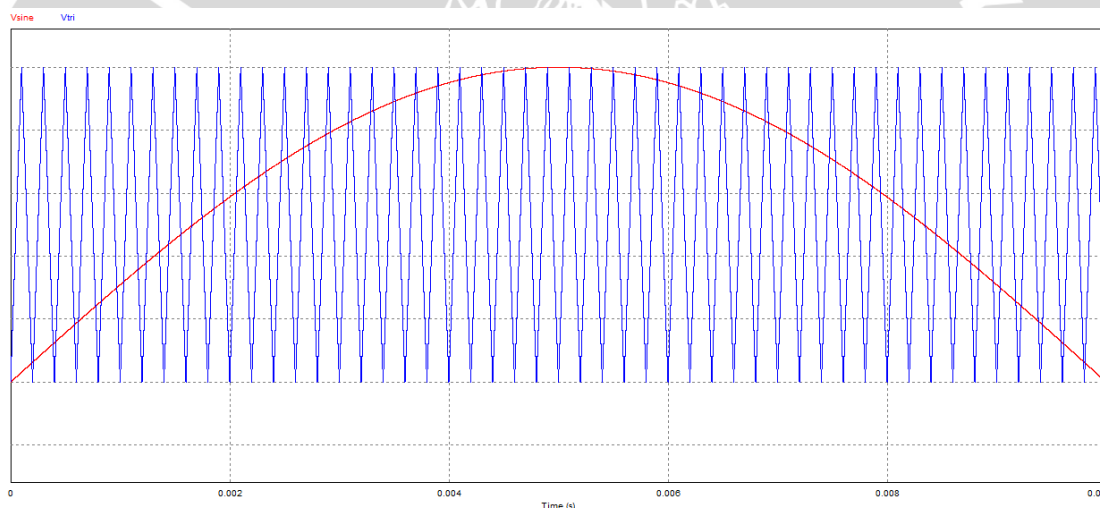
Sinyal *switching* dalam perancangan akan dibantu dengan bantuan *software simulator* PSIM untuk menghasilkan tabel yang akan digunakan pada data program. Pada simulasi terdapat dua buah sinyal sinusoida yang berbeda fasa 180 derajat dan sinyal segitiga. Bentuk sinyal *switching* pada *low side* merupakan komplemen dari *high side*. Hal ini digunakan sebagai pengisian kapasitor *bootstrap*.

Pada penelitian sebelumnya, inverter sinusoidal yang terisolasi oleh transformer disarankan untuk memiliki operasi frekuensi *switching* antara 5kHz sampai 8kHz. Jika melebihi dari rentang frekuensi tersebut maka dapat menghasilkan rugi inti yang lebih

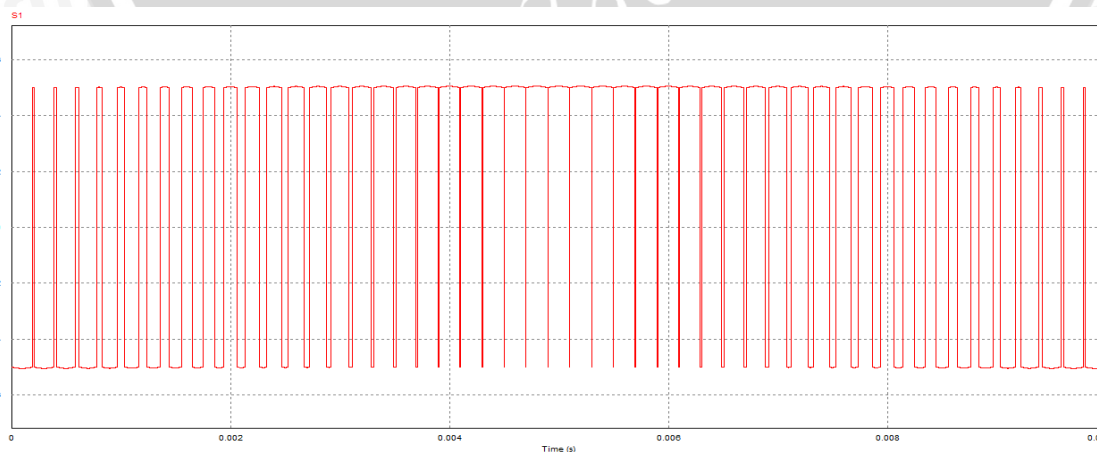
besar pada transformer jenis LF (*low frequency*). Dipilih sinyal segitiga yang mana bertindak sebagai sinyal *carrier* memiliki frekuensi sebesar 5kHz. Sedangkan sinyal sinusoida memiliki frekuensi sebesar 50Hz sesuai dengan kebutuhan beban.



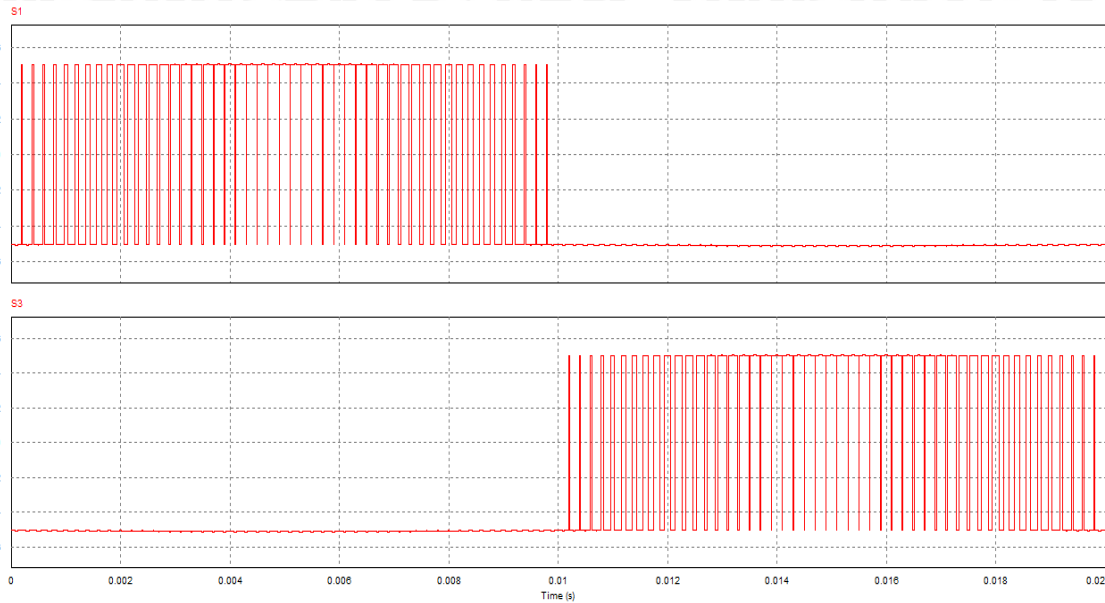
Gambar 4.8 Perencanaan sinyal *switching* pada PSIM



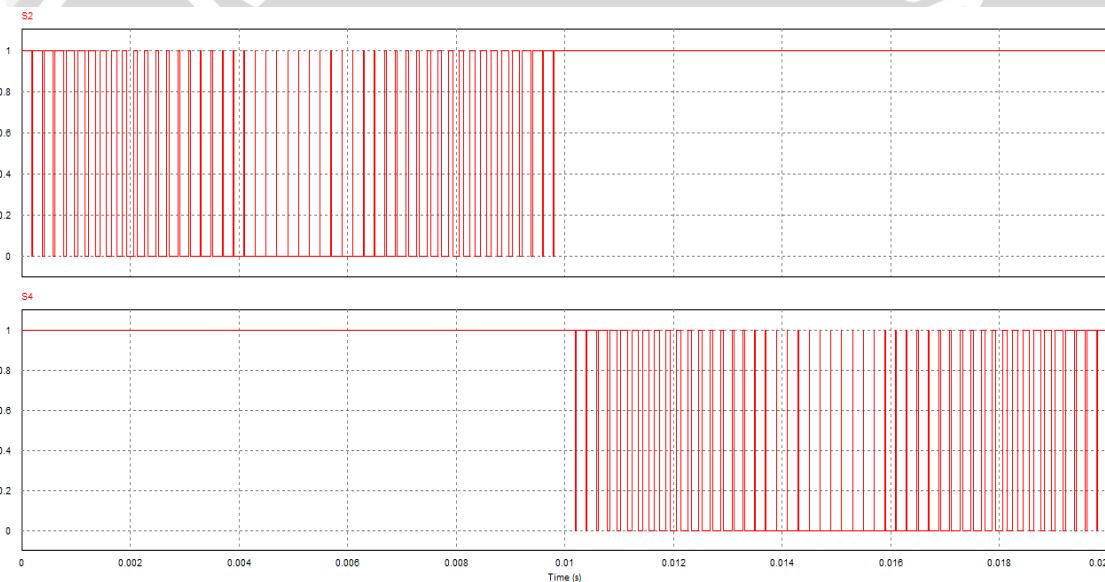
Gambar 4.9 Komparasi sinyal sinusoida dan segitiga pada PSIM



Gambar 4.10 Hasil komparasi sinyal sinusoida dan segitiga



Gambar 4.11 Hasil komparasi pada saklar S_1 dan S_3 (*high side*)



Gambar 4.12 Hasil komparasi pada saklar S_3 dan S_4 (*low side*)

Dari hasil komparasi antara sinyal sinusoida dan segitiga seperti pada gambar 4.11 diperoleh data waktu tiap perubahan nilai *on* ke *off* atau sebaliknya. Karena *switching* pada saklar S_1 & S_3 identik maka hanya perlu 1 tabel saja. Untuk penghasil sinyal pada *low side* juga tidak perlu dibentuk *look up table* karena sinyal berdasarkan komplemen dari sinyal *high side*. Data waktu pada tabel 4.1 akan dikonversi menjadi data OCR yang nantinya datanya dimasukkan pada mikrokontroler. Data yang dibutuhkan cukup setengah dari periode total (0.01 s) karena sinyal berbentuk simetri. Hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Waktu nyala padam sinyal pada simulasi PSIM, $m_a = 1$

No	Waktu (us)	Kondisi
1	194	on
2	206	off
3	387	on
4	413	off
5	582	on
6	620	off
7	776	on
8	825	off
9	970	on
10	1032	off
11	1164	on
12	1240	off
13	1360	on
14	1444	off
15	1553	on
16	1650	off
17	1747	on
18	1855	off
19	1942	on
20	2060	off
21	2138	on
22	2265	off
23	2333	on
24	2470	off
25	2528	on
26	2674	off
27	2724	on
28	2879	off
29	2920	on
30	3082	off
31	3117	on
32	3286	off
33	3313	on
34	3489	off
35	3511	on
36	3692	off
37	3708	on
38	3894	off
39	3906	on
40	4096	off
41	4104	on
42	4298	off
43	4302	on
44	4499	off
45	4500	on
46	4699	off
47	4700	on
48	4900	off
49	5100	on
50	5300	off

Perhitungan konversi dari waktu ke nilai OCR yang disajikan dalam bentuk tabel inilah yang disebut *look up table* :

$$\text{Nilai OCR} = \text{clk MK} \times (t_{\text{on}} - t_{\text{off}})$$

dimana nilai clk MK menggunakan 8MHz (*internal clock*). Nilai OCR didapat :

Tabel 4.2 *Look up table* $m_a = 1$

No	Nilai OCR <i>switching</i>
1	96
2	208
3	304
4	392
5	496
6	608
7	672
8	776
9	864
10	944
11	1016
12	1096
13	1168
14	1240
15	1296
16	1352
17	1408
18	1448
19	1488
20	1520
21	1552
22	1576
23	1592
24	1598
25	1598

Nilai OCR ke 25 adalah nilai tengah dari sinyal *switching* yang nantinya akan dimasukkan pada mikrokontroler. Sinyal SPWM pada metode *unipolar switching* yang memiliki alur nilai t_{on} yang berubah dari kecil menuju nilai yang besar pada setengah periode total, dan di setengah periode kemudian nilai t_{on} berubah dari nilai besar menuju kecil, sehingga nilai OCR diatas nomor 25 tidak perlu dicari lagi.

4.5.2 Simulasi rangkaian *full bridge inverter*

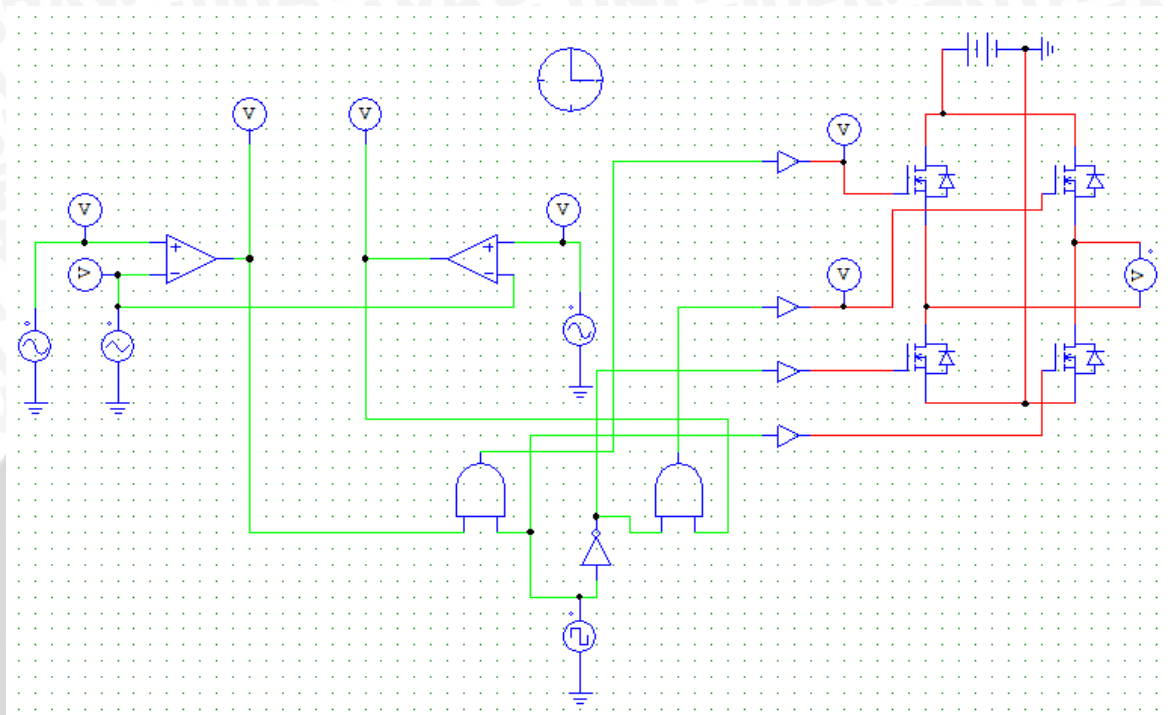
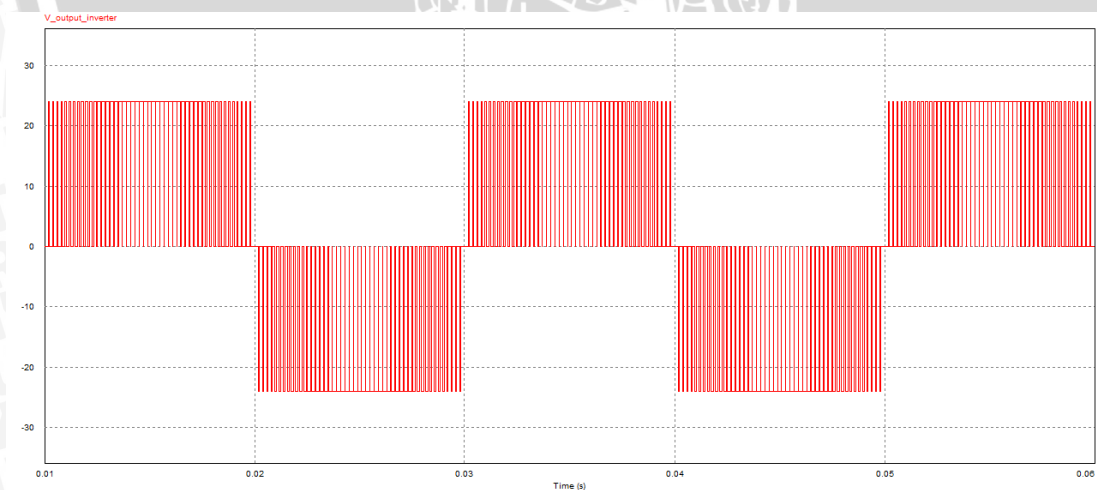
Simulasi pada *full bridge inverter* digunakan sebagai pembandingan hasil perancangan alat yang telah jadi. Perancangan simulasi *full bridge inverter* sebagai berikut ;

1. V_{dc} sebagai sumber inverter sebesar 26 volt, sesuai dengan tegangan baterai pada saat pengujian.
2. Bentuk sinyal pada *full bridge inverter* memiliki spesifikasi :

Tabel 4.3 Nilai frekuensi *switching* dan dasar

Frekuensi <i>switching</i>	5000 Hz
Frekuensi dasar	50 Hz

Berikut ini merupakan rangkaian *full bridge* inverter tanpa beban :

Gambar 4.13 Rangkaian *full bridge* inverter tanpa bebanGambar 4.14 Sinyal keluaran *full bridge* inverter, $m_a = 1$

Setelah berhasil menghasilkan sinyal *output* pada rangkaian *full bridge* inverter melalui simulasi, kemudian dibandingkan nilai tegangan hasil simulasi dengan teori. Perbandingan tidak hanya pada satu nilai m_a saja, tetapi dari nilai m_a 0.7 sampai 1.

Hasilnya perbandingan disajikan pada tabel 4.4.

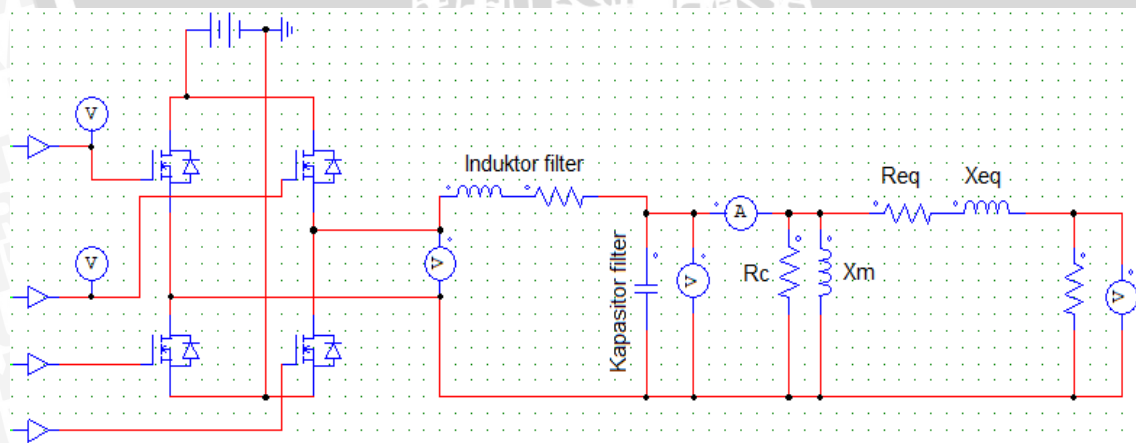
Tabel 4.4 Perbandingan tegangan keluaran *full bridge* inverter teori dan simulasi

Ma	Vin (V)	Vout Teori (V)	Vout Simulasi (V)
1	26	20.75	20.74
0.9	26	19.75	19.68
0.8	26	18.57	18.55
0.7	26	17.3	17.35

Hasil tegangan keluaran dari *full bridge* inverter dibandingkan antara hasil teori dan simulasi menunjukkan nilai yang sama. Sehingga perancangan simulasi dapat dijadikan acuan pada pembuatan rangkaian *full bridge* inverter yang sebenarnya.

4.5.3 Simulasi *low pass filter*

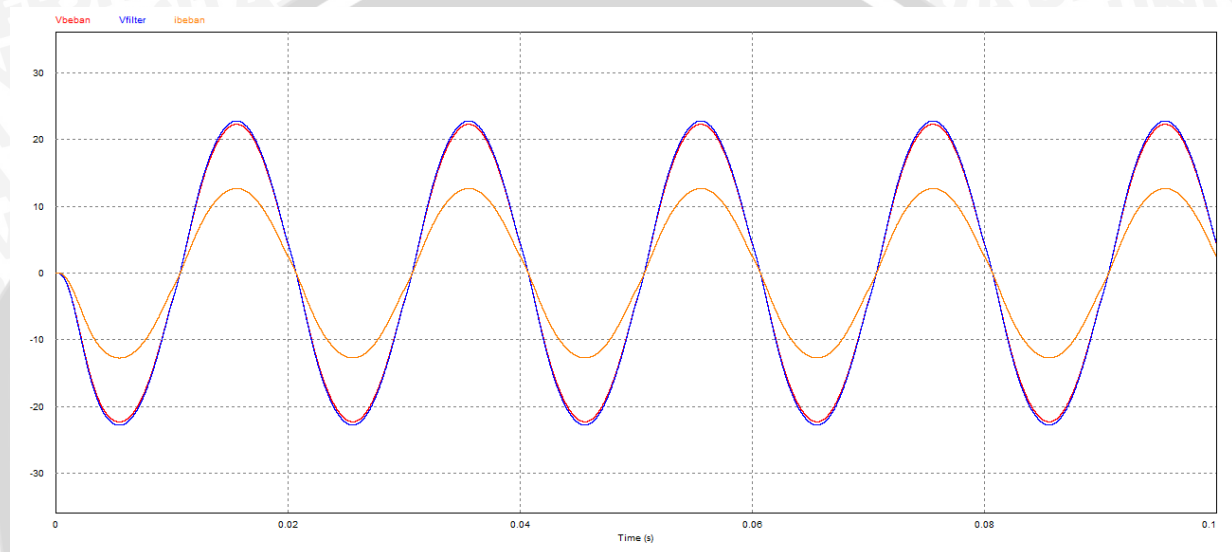
Simulasi pada *low pass filter* sangat membantu dalam perancangan karena filter yang digunakan merupakan jenis filter pasif sehingga nilai dari pembentuk komponen filter sangat menentukan hasil dari keluaran inverter. Penentuan nilai induktor dan kapasitor pembentuk *low pass filter* pada perancangan diperoleh dari hasil simulasi karena nilai induktansi transformator yang cukup besar sehingga mempengaruhi peredaman pada filter pasif. Hasil dari pengujian transformator yang menghasilkan rangkaian ekuivalen kemudian masuk dalam simulasi dari *low pass filter*. Berikut ini merupakan rangkaian simulasi *low pass filter*.



Gambar 4.15 Simulasi *full bridge* beserta filter LC dan rangkaian ekuivalen transformator

Nilai induktor dan kapasitor pada filter dipilih untuk mencapai gelombang keluaran yang mendekati sinusoidal berdasarkan hasil simulasi. Pada proses simulasi ternyata

diperoleh kesimpulan yaitu nilai induktor yang semakin besar menyebabkan tegangan keluaran menjadi kecil. Sedangkan untuk pemilihan kapasitor, berdasarkan hasil dari simulasi jika nilai kapasitor semakin kecil, maka bentuk gelombang tegangan keluaran akan menghasilkan *ripple* yang semakin besar. Dari hasil simulasi diperoleh nilai induktor dan kapasitor filter sebesar $L = 1\text{mH}$, dan $C = 500\ \mu\text{F}$. Berikut merupakan bentuk gelombang tegangan keluaran pada hasil filter dan pada tegangan dan arus keluaran rangkaian ekuivalen transformator.



Gambar 4.16 Bentuk gelombang tegangan keluaran pada filter dan tegangan dan arus pada rangkaian ekuivalen transformator

Nilai induktor dan kapasitor pada filter dari hasil simulasi diwujudkan dan digunakan sebagai nilai filter pada perancangan inverter satu fasa sinusoidal.

BAB V

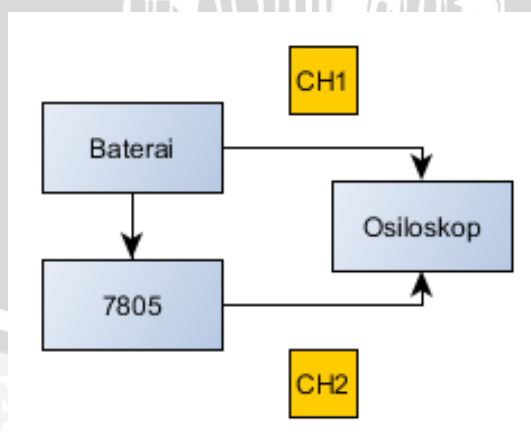
PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian pada alat bertujuan untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan. Pengujian dimulai dengan setiap rangkaian terlebih dahulu baru kemudian pengujian sistem keseluruhan. Pengujian pada tiap rangkaian terlebih dahulu untuk mempermudah dalam hal analisa dari inverter satu fasa sinusoidal apakah sesuai dengan perencanaan atau tidak. Pengujian yang dilakukan meliputi :

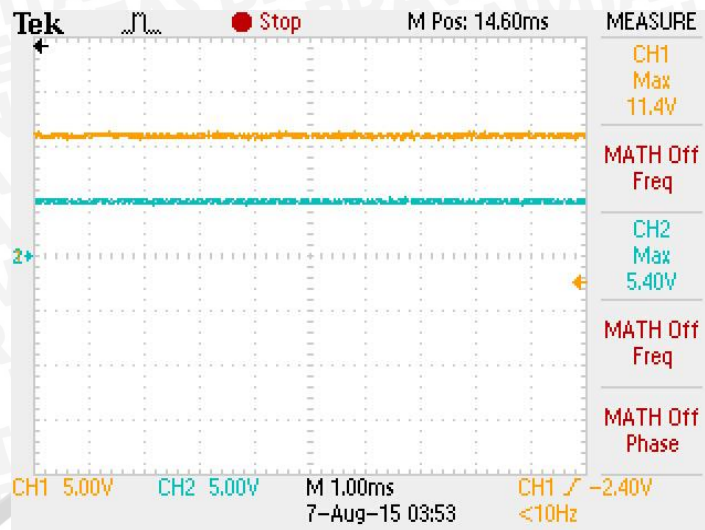
1. Pengujian rangkaian catu daya
2. Pengujian sinyal *switching* pada mikrokontroler
3. Pengujian *driver* MOSFET
4. Pengujian rangkaian *full bridge* inverter
5. Pengujian *low pass* filter
6. Pengujian transformator *step up*
7. Pengujian sistem keseluruhan

5.1 Pengujian rangkaian catu daya

Pengujian ini digunakan untuk mengetahui kesesuaian keluaran rangkaian catu daya yang akan digunakan sebagai *supply* pada mikrokontroler. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan masukan rangkaian catu daya dengan sumber baterai li-po. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan CH1 pada baterai, dan CH2 pada keluaran 7805.



Gambar 5.1 Diagram blok pengujian catu daya

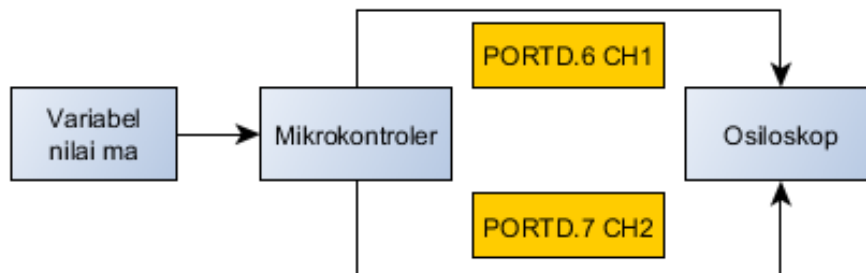


Gambar 5.2 Hasil pengujian rangkaian catu daya menggunakan osiloskop

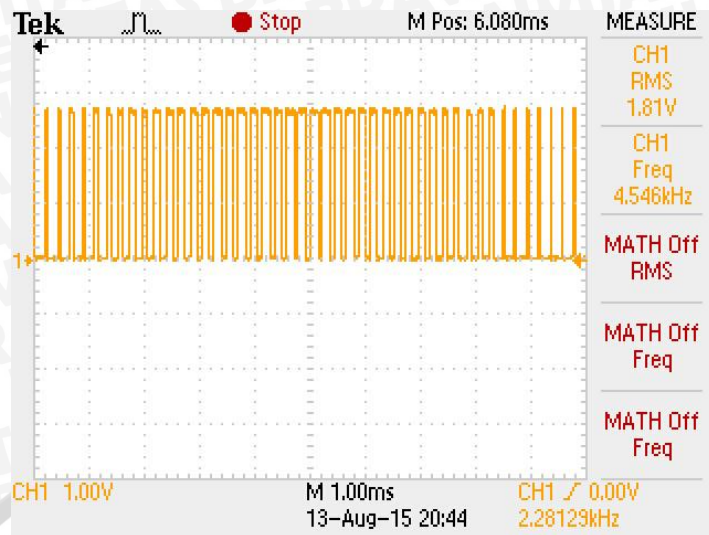
Dari hasil pengujian rangkaian catu daya dihasilkan nilai tegangan keluaran melalui regulator linier 7805 sebesar 5.4 volt. Nilai tersebut masih berada dalam range tegangan kerja mikrokontroler ATmega16 sehingga rangkaian catu daya dapat diaplikasikan sebagai catu pada mikrokontroler.

5.2 Pengujian sinyal *switching* pada mikrokontroler

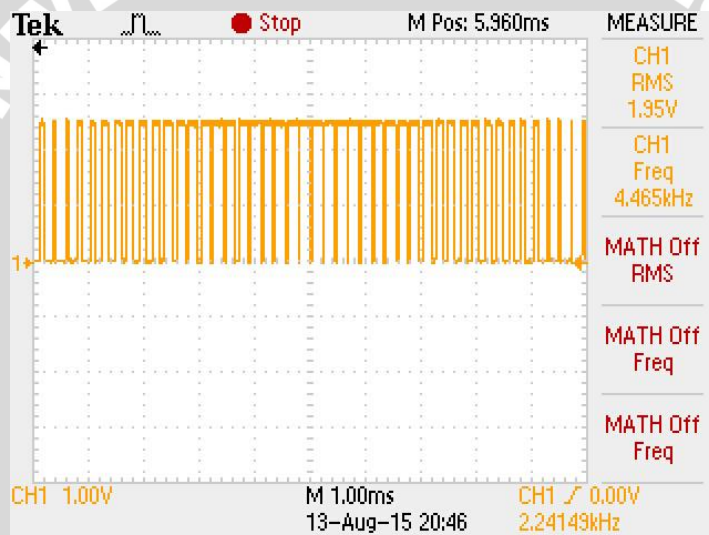
Pengujian sinyal *switching* dilakukan dengan melihat hasil keluaran pada mikrokontroler ATmega16 menggunakan osiloskop. Sinyal *switching* yang dihasilkan pada mikrokontroler menghasilkan 2 buah sinyal identik untuk *high side* dan 2 buah sinyal identik pula untuk *low side*. Bentuk sinyal *switching* pada *low side* merupakan komplemen dari *high side*. Sinyal *switching* memiliki frekuensi 5 kHz dengan frekuensi fundamentalnya sebesar 50 Hz. Pada perancangan terdapat 4 buah sinyal yang berbeda berdasarkan nilai m_a . Metode pengujiannya dengan menghubungkan PORTD.6 pada CH1 dan PORTD.7 pada CH2.



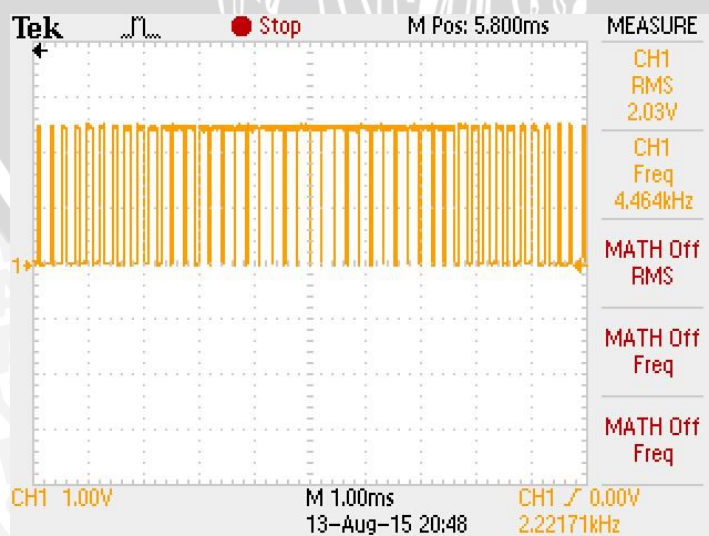
Gambar 5.3 Diagram balok pengujian *switching* mikrokontroler



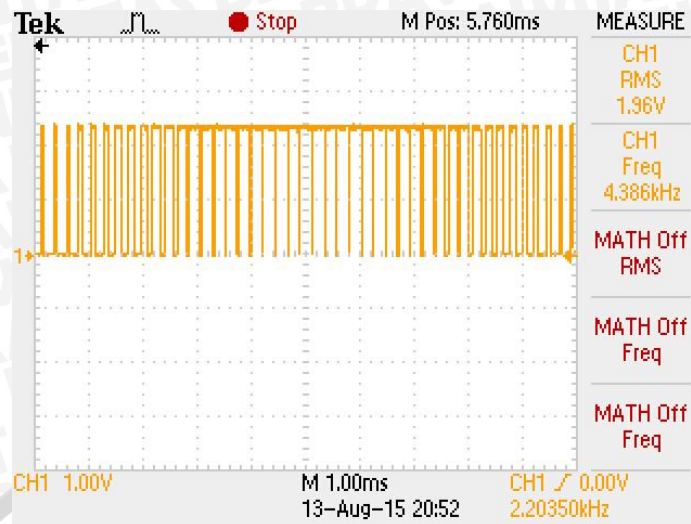
Gambar 5.4 Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.7$)



Gambar 5.5 Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.8$)



Gambar 5.6 Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 0.9$)



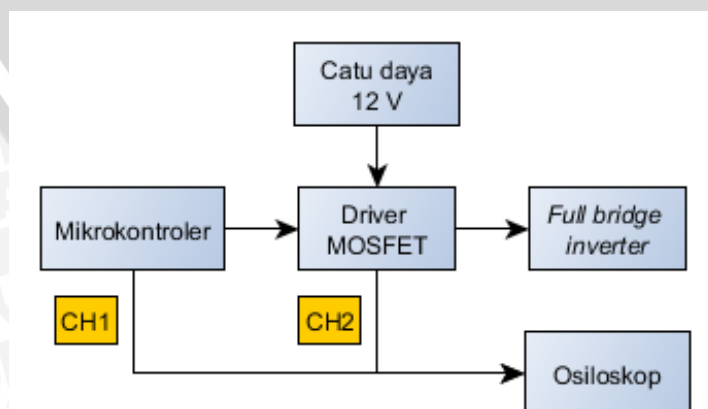
Gambar 5.7 Hasil pengamatan osiloskop pada keluaran mikrokontroler ($m_a = 1$)

5.3 Pengujian rangkaian *driver* MOSFET

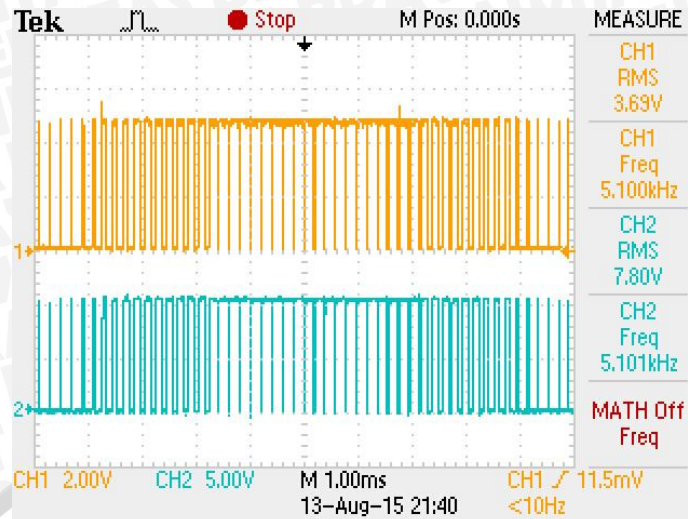
Pengujian *driver* MOSFET untuk mengetahui apakah *driver* MOSFET telah memberikan sinyal yang sesuai dengan keluaran dari mikrokontroler. Rangkaian *driver* MOSFET dinyatakan berhasil jika mampu menghasilkan sinyal keluaran sesuai dengan sinyal yang diberikan dari mikrokontroler. Pengujian terbagi menjadi dua yaitu pada sisi *high side* dan *low side* MOSFET. Peralatan yang dibutuhkan adalah :

1. Catu daya 24 V
2. Mikrokontroler ATmega16
3. Rangkaian *driver* MOSFET
4. Rangkaian *full bridge* inverter
5. Osiloskop

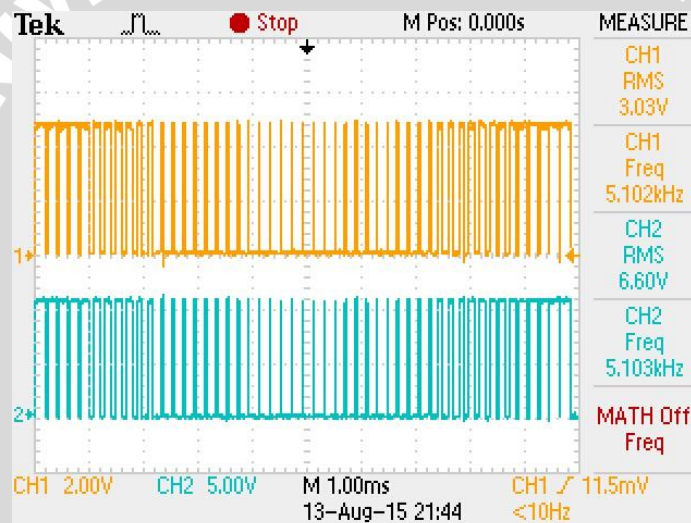
Proses pengujian dengan cara menghubungkan rangkaian mikrokontroler, rangkaian *driver* MOSFET, dan rangkaian *full bridge* inverter.



Gambar 5.8 Diagram balok pengujian *driver* MOSFET



Gambar 5.9 Hasil pengamatan osiloskop pada *high side gate driver* MOSFET dan mikrokontroler



Gambar 5.10 Hasil pengamatan osiloskop pada *low side gate driver* MOSFET dan mikrokontroler

Dari proses pengujian dapat disimpulkan jika hasil perancangan IR2110 dapat digunakan karena sinyal keluaran sama dengan yang diberikan dari mikrokontroler.

5.4 Pengujian rangkaian *full bridge inverter*

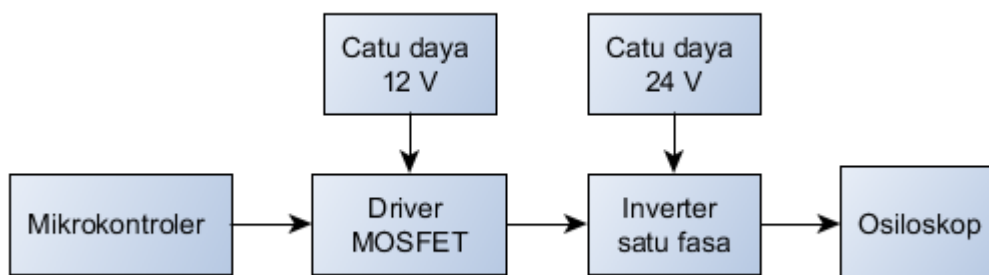
Pengujian ini terbagi atas dua, yaitu pengujian pada saat tanpa beban dan pengujian berbeban. Peralatan yang dibutuhkan adalah :

1. Catu daya 24 V
2. Mikrokontroler AT Mega 16
3. Rangkaian *driver* MOSFET

4. Rangkaian *full bridge* inverter
5. Beban
6. Osiloskop
7. Fluke 43B

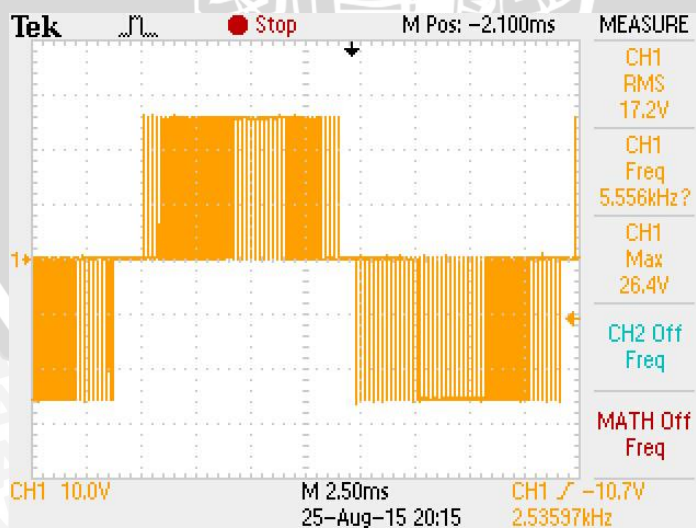
5.4.1 Pengujian tanpa beban

Diagram balok pengujian tanpa beban pada *full bridge* inverter :

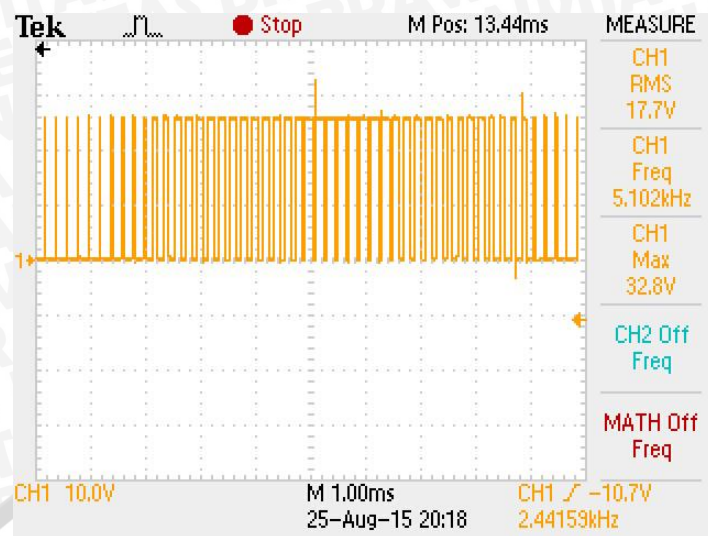


Gambar 5.11 Diagram balok pengujian rangkaian *full bridge* inverter

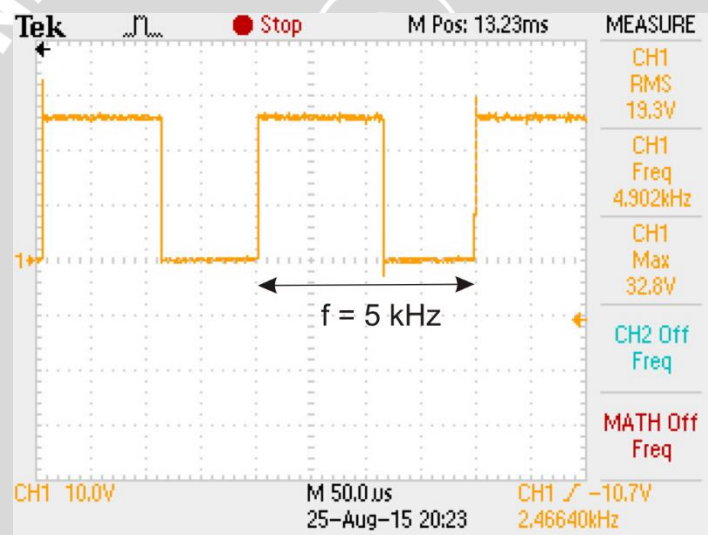
Pengujian pertama beban terlebih dahulu dilepas. Hal ini untuk membandingkan hasil tegangan keluaran rangkaian *full bridge* inverter dari hasil teori, simulasi dan perancangan alat. Hal ini penting dilakukan untuk menguji apakah rangkaian *full bridge* inverter sesuai dengan hasil perhitungan maupun simulasi sehingga hasil dari perancangan dapat dinyatakan berhasil. Hasil tegangan keluaran *full bridge* inverter :



Gambar 5.12 Hasil pengamatan osiloskop pada tegangan keluaran *full bridge* inverter ($m_a = 0.8$)



Gambar 5.13 Hasil pengamatan osiloskop pada setengah periode tegangan keluaran *full bridge* inverter ($m_a = 0.8$)



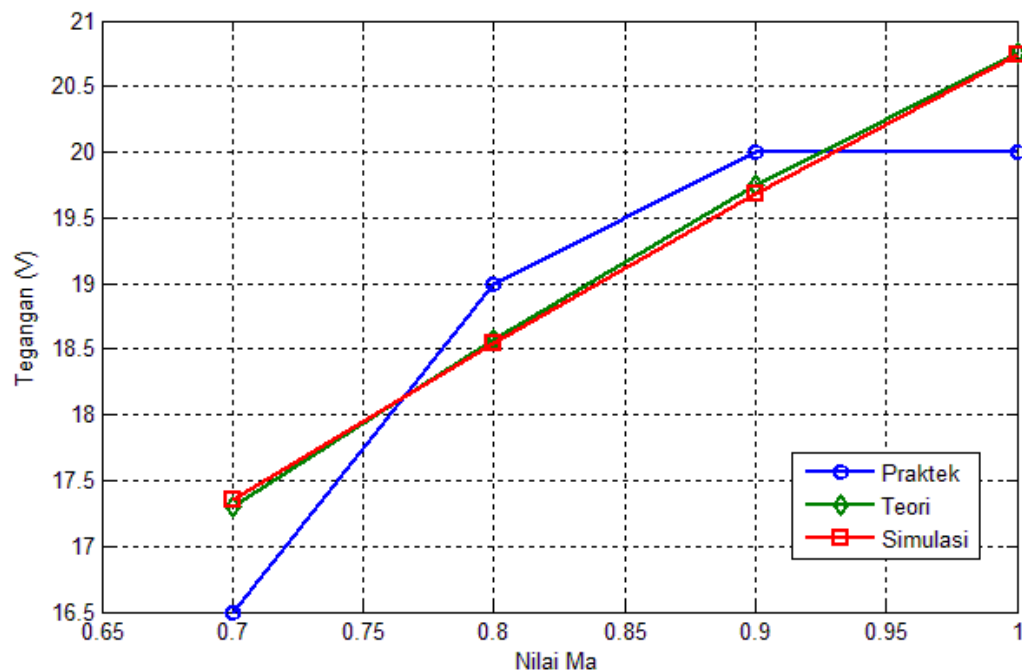
Gambar 5.14 Hasil pengamatan osiloskop pada frekuensi *switching* tegangan keluaran ($m_a = 0.8$)

Pada pengujian *full bridge* inverter tanpa beban, bentuk gelombang tegangan pada sisi keluaran *full bridge* inverter sesuai dengan perancangan yaitu memiliki frekuensi *switching* bernilai 5 kHz. Bentuk gelombang tegangan pada sisi keluaran *full bridge* inverter telah sesuai dengan perancangan yang berbentuk gelombang SPWM yang disajikan pada gambar 5.13.

Pada perancangan, inverter memiliki 4 nilai m_a . Pada pengujian ini membahas tentang pengaruh m_a pada sisi tegangan keluaran *full bridge* inverter. Hasil pengujian sesuai pada tabel dibawah, dan juga dibandingkan dengan perhitungan teori, dan simulasi.

Tabel 5.1 Hasil pengujian *full bridge* inverter tanpa beban dengan variasi nilai m_a

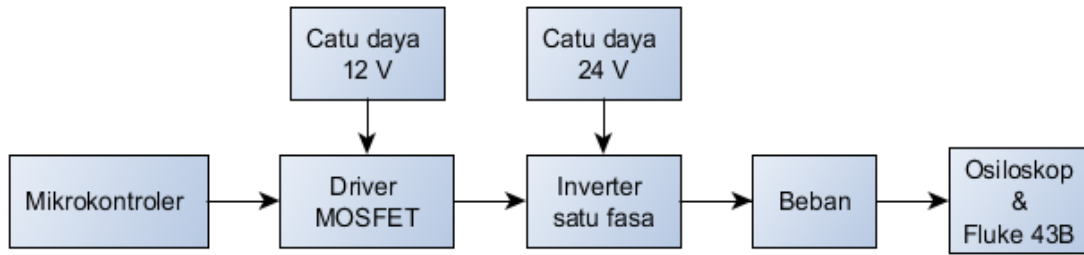
Ma	Vin (V)	Vout Praktek (V)	Vout Teori (V)	Vout Simulasi (V)
1	26	20	20.75	20.74
0.9	26	20	19.75	19.68
0.8	26	19	18.57	18.55
0.7	26	16.5	17.3	17.35

Gambar 5.15 Grafik karakteristik pengaturan m_a terhadap tegangan keluaran tanpa beban secara teori, simulasi, dan praktek

Dari gambar grafik diatas yang diperoleh tegangan keluaran dari hasil pengujian alat secara langsung, teori, dan simulasi disimpulkan bahwa semakin kecil nilai m_a maka hasil tegangan keluaran pada rangkaian *full bridge* inverter semakin kecil pula. Dari tabel diatas juga dapat disimpulkan bahwa rangkaian *full bridge* inverter sesuai dengan simulasi maupun teori.

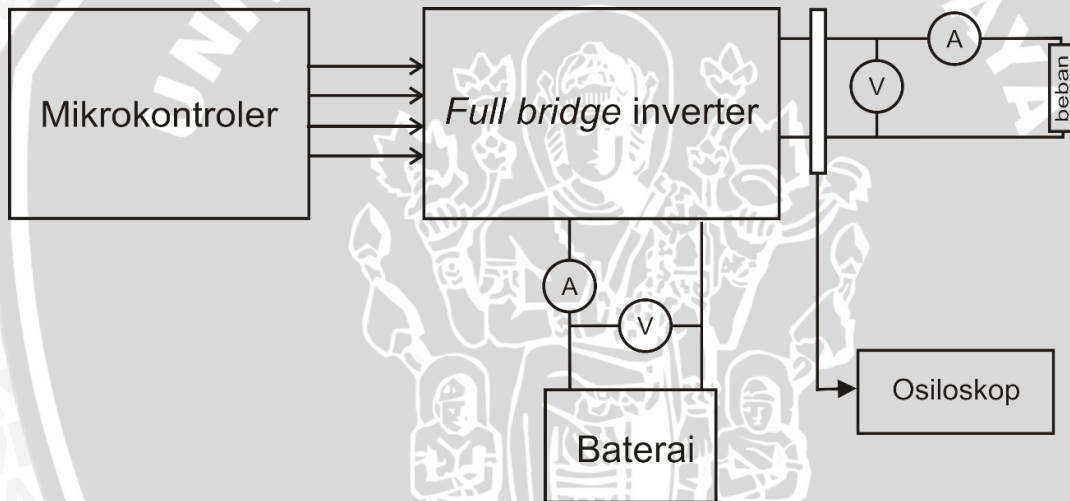
5.4.2 Pengujian berbeban

Diagram balok pengujian tanpa beban pada *full bridge* inverter :



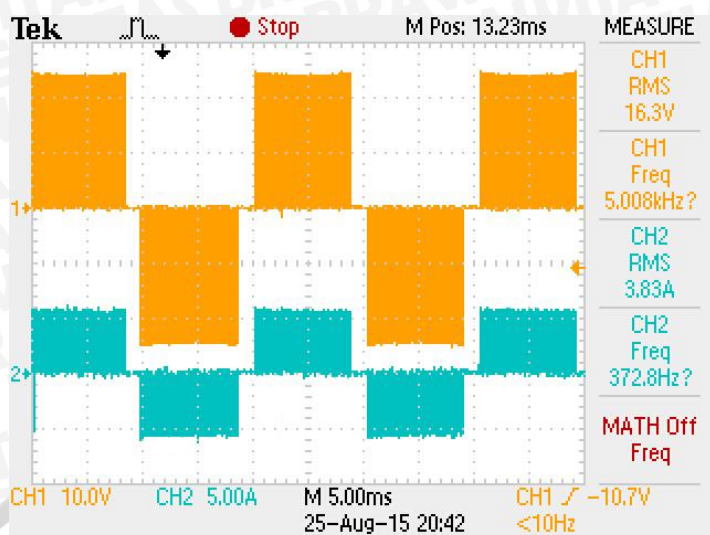
Gambar 5.16 Diagram balok pengujian berbeban pada rangkaian *full bridge* inverter

Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui nilai efisiensi dari rangkaian *full bridge* inverter ketika terpasang pada beban. Pada pengujian ini menggunakan beban resistor dengan 4 variasi nilai resistansi. Rangkaian pengujian ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 5.17 Rangkaian pengujian efisiensi pada rangkaian *full bridge* inverter

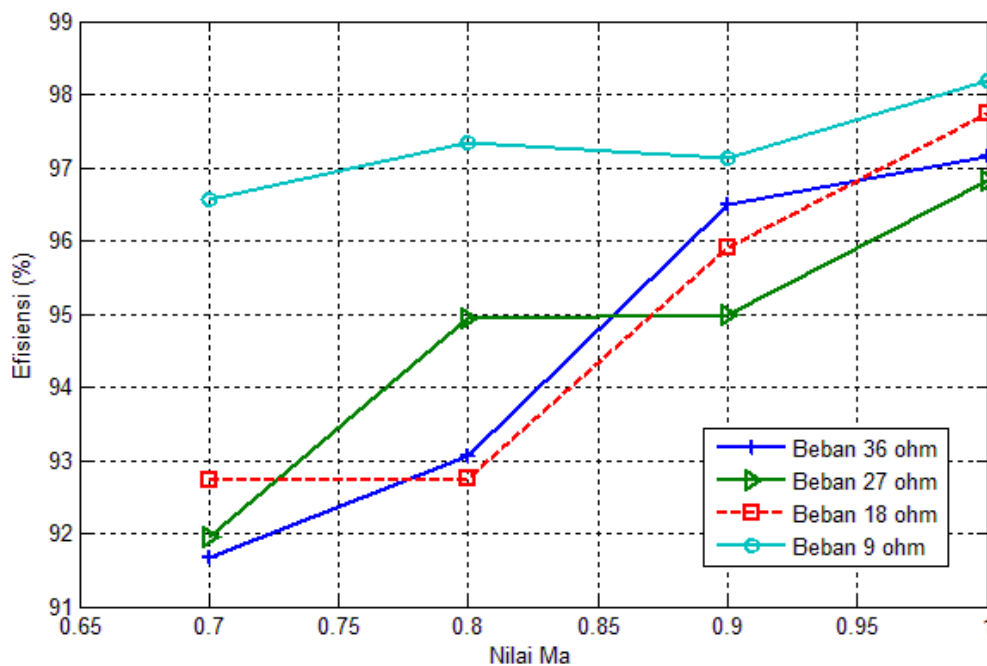
Prosedur pengujiannya yaitu menggunakan salah satu nilai resistor terlebih dahulu yang digunakan sebagai beban. Kemudian catat nilai arus dan tegangan pada sisi sumber dengan nilai m_a 0.7 sampai 1. Setelah teruji dengan semua nilai m_a , beban diubah dengan rentang resistansi yang sama. Hasil pengamatan osiloskop diwakili pada nilai $m_a = 1$ dan pada beban 9 ohm karena bentuk gelombang yang mirip.



Gambar 5.18 Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus pada keluaran *full bridge* inverter ($m_a = 0.8$, beban = 9 ohm)

Tabel 5.2 Hasil pengujian *full bridge* inverter dengan variasi nilai m_a

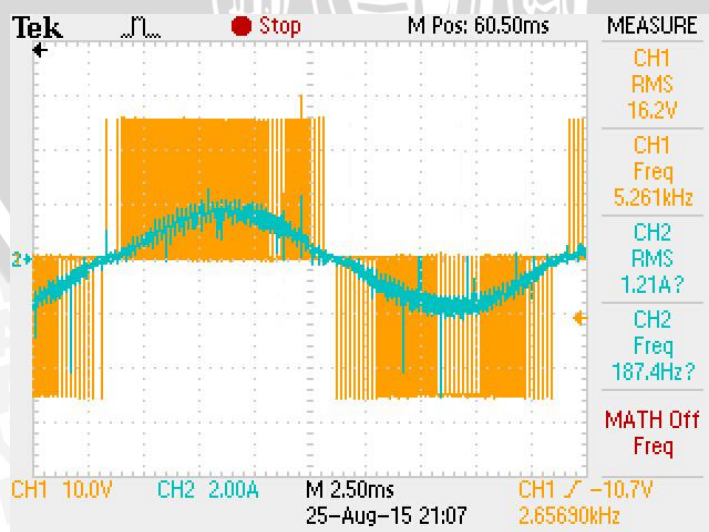
Beban (ohm)	Ma	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi
36	0.7	26	0.3	16.25	0.44	7.8	7.15	91.67
	0.8	26	0.39	18.5	0.51	10.14	9.435	93.05
	0.9	25.5	0.42	19.5	0.53	10.71	10.335	96.50
	1	25.5	0.425	19.5	0.54	10.838	10.53	97.16
27	0.7	27	0.385	16.2	0.59	10.395	9.558	91.95
	0.8	26.5	0.5	18.5	0.68	13.25	12.58	94.94
	0.9	26.5	0.55	19.5	0.71	14.575	13.845	94.99
	1	26	0.55	19.5	0.71	14.3	13.845	96.82
18	0.7	26.5	0.56	16	0.86	14.84	13.76	92.72
	0.8	26.5	0.725	18	0.99	19.213	17.82	92.75
	0.9	26	0.8	19	1.05	20.8	19.95	95.91
	1	26	0.8	19	1.07	20.8	20.33	97.74
9	0.7	25.5	1	15.2	1.62	25.5	24.624	96.56
	0.8	25.2	1.32	17.5	1.85	33.264	32.375	97.33
	0.9	25.2	1.45	18.2	1.95	36.54	35.49	97.13
	1	25.2	1.45	18.4	1.95	36.54	35.88	98.19



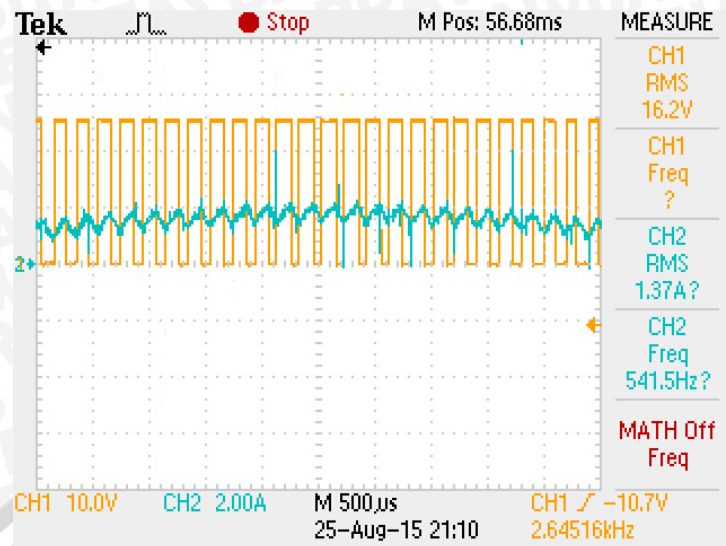
Gambar 5.19 Grafik efisiensi rangkaian *full bridge* terhadap nilai m_a pada rangkaian *full bridge* inverter

Dari penyajian grafik dapat disimpulkan bahwa nilai efisiensi tertinggi pada rangkaian *full bridge* inverter saat nilai $m_a = 1$. Dari perhitungan nilai efisiensi, rangkaian *full bridge* inverter hasil perancangan layak untuk digunakan dalam sistem.

Pengujian selanjutnya yaitu dengan memberikan beban RL. Pada pengujian ini hanya melihat bentuk gelombang tegangan dan arus apakah sesuai dengan teori atau tidak. Pada pengujian ini menggunakan beban $R = 18 \Omega$, dan $L = 4.27 \text{ mH}$.



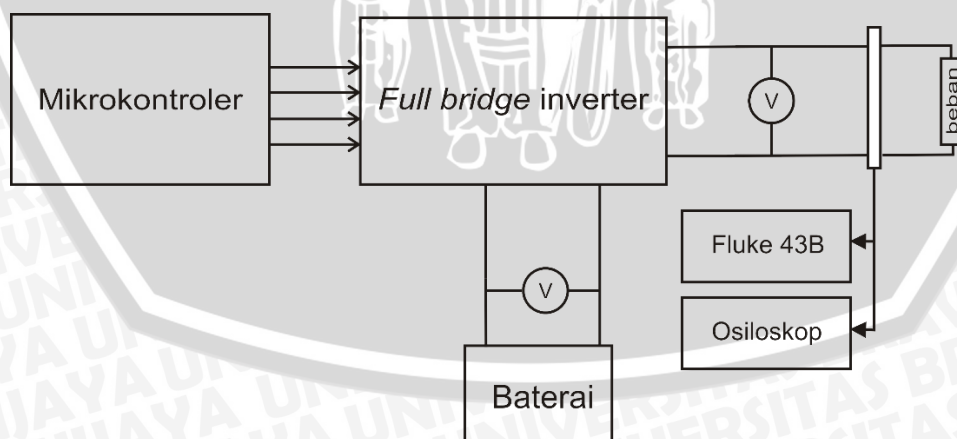
Gambar 5.20 Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus beban RL ($m_a = 0.7$)



Gambar 5.21 Hasil pengamatan osiloskop tegangan dan arus beban RL ($m_a = 0.7$)

Pada pengujian beban RL, diperoleh hasil arus yang berbentuk sinusoida terdistorsi. Bentuk gelombang arus dapat berbentuk demikian akibat dari penggunaan metode *switching* SPWM. Perilaku arus pada saat waktu *on*, arus akan cenderung naik, sedangkan pada saat *off*, perilaku arus cenderung turun seperti yang tersaji pada gambar 5.21. Metode SPWM yang memiliki ciri pada perubahan nilai t_{on} yang berubah-ubah sedemikian rupa sehingga terbentuk arus yang menyerupai sinusoida.

Pengujian selanjutnya yaitu untuk mengetahui pengaruh nilai modulasi amplitudo (m_a) terhadap nilai THD yang terbentuk pada rangkaian *full bridge* inverter. Pengujian dilakukan dengan 4 variasi nilai m_a . Rangkaian pengujian THD tersaji pada gambar dibawah.



Gambar 5.22 Rangkaian pengujian THD pada *full bridge* inverter

Prosedur pengujian dilakukan dengan menghubungkan rangkaian seperti gambar diatas. Beban yang digunakan yaitu beban resistif dengan nilai 54 Ω . Pada setiap

perubahan nilai m_a , diamati nilai THD melalui fluke 43B. Pengujian dilakukan dengan beban 54 ohm, frekuensi sinyal *switching* 5 kHz dan frekuensi dasar 50 Hz diperoleh data pada tabel 5.3.

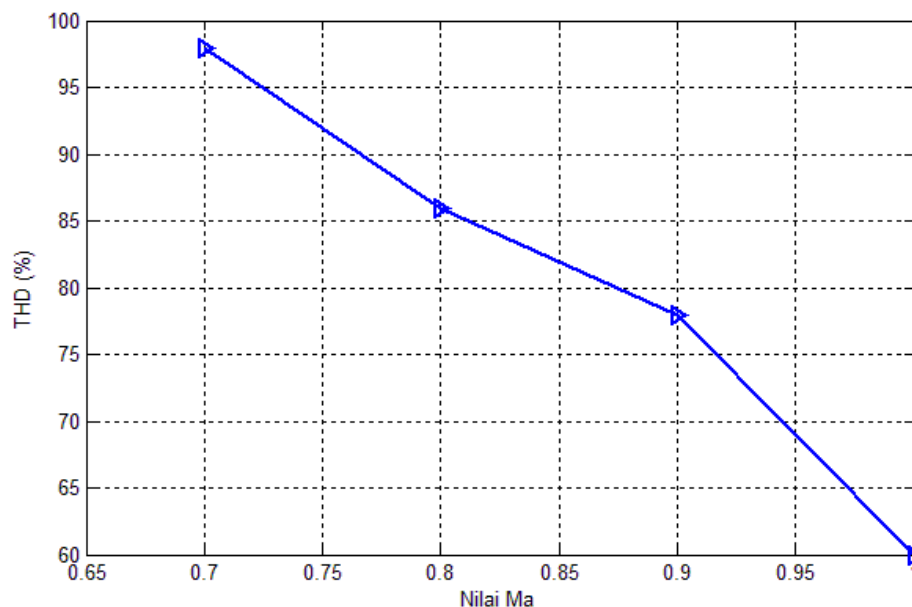
Tabel 5.3 Hasil pengujian THD dengan fluke 43B

M_a	THD (%)
0.7	16.5
0.8	11.2
0.9	7.4
1	7.2

Namun pembacaan harmonisa pada alat fluke 43B hanya sampai orde ke 51, sedangkan untuk mengukur harmonisa pada orde lebih dari 51 tidak dapat dilakukan. Tetapi dari pembacaan fluke 43B diperoleh tegangan pada frekuensi fundamental sehingga harmonisa total dapat dihitung. Nilai THD hasil dari perhitungan tersaji pada tabel 5.4.

Tabel 5.4 Hasil pengujian THD *full bridge* inverter dengan m_a bervariasi

M_a	V_{out} (V)	$V_{fundamental}$ (V)	THD (%)
0.7	14.72	10.48	98
0.8	15.95	12.08	86
0.9	17.2	13.52	78
1	17.2	14.72	60



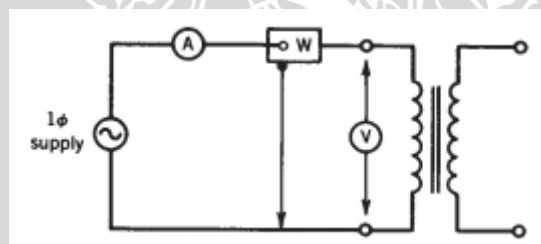
Gambar 5.23 Grafik THD terhadap nilai m_a pada rangkaian *full bridge* inverter

Dari grafik diatas diperoleh kesimpulan bahwa semakin besar nilai m_a maka diperoleh nilai presentase THD yang lebih kecil.

5.5 Pengujian transformator

Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui nilai resistansi dan reaktansi yang terdapat pada transformator. Selanjutnya dibuat rangkaian ekivalen dari transformator. Hal ini berguna dalam penentuan nilai dari *low pass* filter karena nilai induktansi transformator yang cukup besar.

Untuk memperoleh rangkaian ekivalen dari transformator dibutuhkan 2 pengujian, yaitu pengujian hubung buka dan hubung singkat. Pengujian hubung buka bertujuan untuk mendapatkan nilai resistansi dan reaktansi pemagnetan, dan pengujian hubung singkat untuk mendapatkan nilai resistansi dan reaktansi dari belitan. Pada pengujian dilakukan pada belitan transformator di sisi tegangan tinggi dikarenakan sumber tegangan AC 1 fasa di laboratorium hanya memiliki rating arus 6.3 A, sedangkan transformator memiliki rating daya 440 VA. Berikut merupakan rangkaian pengujian hubung buka dan hubung singkat beserta perhitungannya :



Gambar 5.24 Rangkaian pengujian transformator hubung buka

Tabel 5.5 Hasil pengujian transformator hubung buka

Uji hubung buka
$V_{oc} = 220 \text{ V}$
$I_{oc} = 0.11 \text{ A}$
$P_{oc} = 15.73 \text{ W}$

$$\cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \times I_{oc}}$$

$$\cos \theta = \frac{15.73}{220 \times 0.11}$$

$$\cos \theta = 0.65 \text{ (lagging)}$$

$$\theta = -49.45^\circ$$

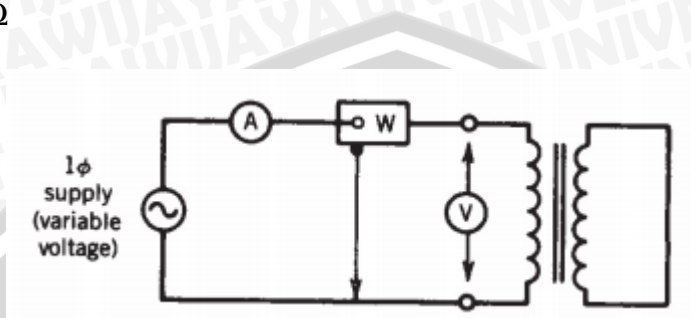
$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle \theta$$

$$Y_E = \frac{0.11}{220} \angle -49.45^\circ$$

$$Y_E = 3.25 \times 10^{-4} - j 3.8 \times 10^{-4}$$

$$R_c = 3076 \Omega$$

$$X_m = 2632 \Omega$$



Gambar 5.25 Rangkaian pengujian transformator hubung singkat

Tabel 5.6 Hasil pengujian transformator hubung singkat

Uji hubung singkat
$V_{sc} = 175 \text{ V}$
$I_{sc} = 2 \text{ A}$
$P_{sc} = 348.25 \text{ W}$

$$\cos \theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} \times I_{sc}}$$

$$\cos \theta = \frac{348.25}{175 \times 2}$$

$$\cos \theta = 0.995$$

$$\theta = 5.731^\circ$$

$$Z_{eq1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta = R_{eq1} + jX_{eq1}$$

$$Z_{eq1} = \frac{175}{2} \angle 5.731^\circ$$

$$R_c = 87.062 \Omega$$

$$X_m = 8.737 \Omega$$

Karena hasil pengujian berada pada sisi tegangan tinggi, parameter dirubah ke sisi transformator tegangan rendah terlebih dahulu sedangkan rasio transformator tidak diketahui. Rasio transformator dapat dicari dengan bantuan alat ukur LCR meter dengan rumus :

$$a = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

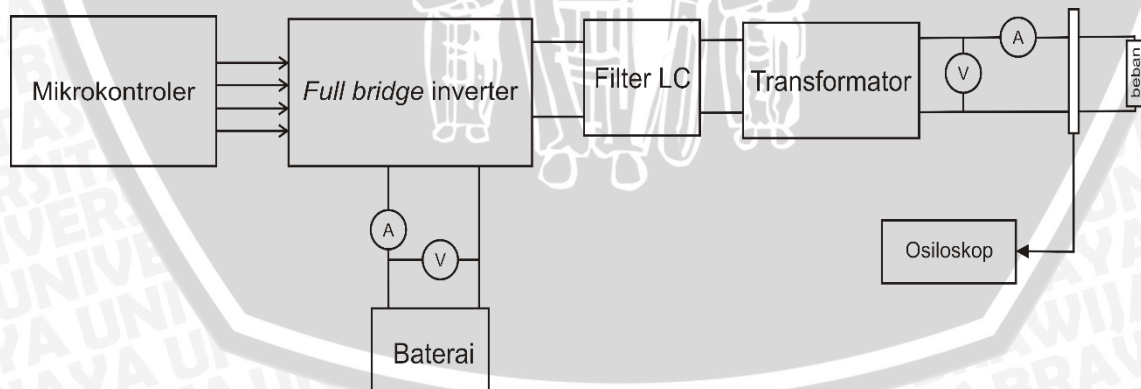
dengan L_1 merupakan induktansi pada sisi tegangan tinggi, dan L_2 adalah induktansi pada sisi tegangan rendah yang diukur menggunakan LCR meter. Pada pengukuran diperoleh nilai $L_1 = 1254$ mH dan $L_2 = 1.288$ mH sehingga diperoleh nilai rasio transformator sebesar 31. Rangkaian ekivalen transformfer dari sisi tegangan rendah diperoleh dari hasil resistansi dan reaktansi dari sisi tegangan tinggi dibagi dengan a^2 sehingga diperoleh rangkaian ekivalen sisi tegangan rendah transformator yang tersaji pada tabel 5.7.

Tabel 5.7 Hasil pengujian transformator sisi belitan tegangan rendah

R_c	3.2 Ω
X_m	2.738 Ω
R_{eq}	0.09 Ω
X_{eq}	0.009 Ω

5.6 Pengujian sistem keseluruhan

Setelah semua balok berjalan dengan semestinya, tiap balok tersebut dirangkai menjadi suatu kesatuan sistem inverter satu fasa sinusoidal untuk beban rumah tangga. Pengujian sistem ini dilakukan dengan cara diberi beban pada sisi tegangan tinggi transformator. Tegangan keluaran dijaga agar tidak berada dibawah tegangan 220 V dengan pengaturan nilai m_a . Pengujian menggunakan 3 beban berbeda yaitu beban bohlam, *Compact Fluorescent Lamp* (CFL), dan kipas angin. Rangkaian pengujian sistem tersaji pada gambar dibawah ini.



Gambar 5.26 Rangkaian pengujian sistem inverter satu fasa sinusoidal berbeban

Pada pengujian beban lampu terdapat beberapa buah bohlam dan CFL yang disusun bertahap dari nilai 50W, 75W, 100W, dan 125W.

Tabel 5.8 Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban bohlam

Daya (W)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Cos ϕ	Ma
50	25	4.6	256	0.2425	1	0.7
75	25	5.8	228	0.34	1	0.7
100	24	8.3	225	0.44	1	0.8
125	22.5	11	220	0.54	1	0.9

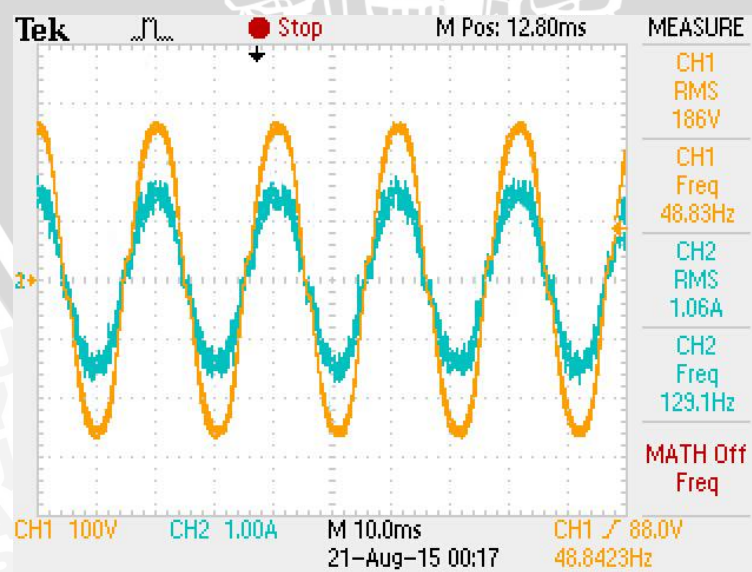
Tabel 5.9 Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban CFL

Daya (W)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Cos ϕ	Ma
50	25.5	4.6	255	0.27	0.8	0.7
75	24.5	6.3	220	0.39	0.85	0.7
100	24	8.7	225	0.46	0.99	0.8
125	22	11.15	220	0.59	1	0.9

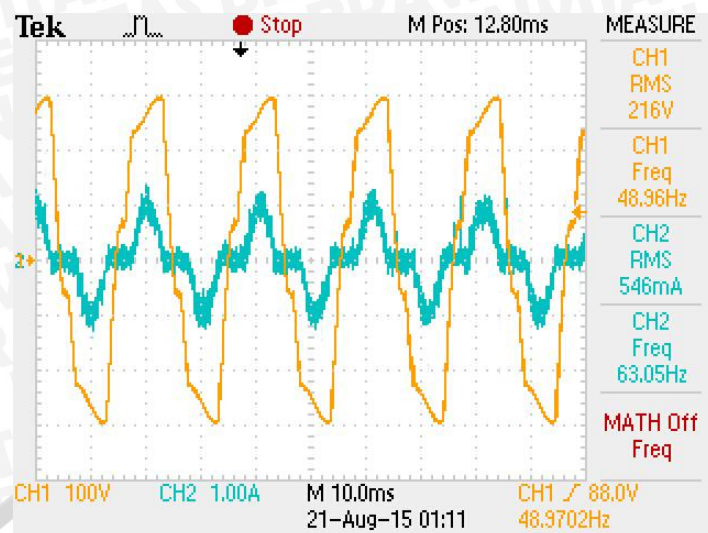
Tabel 5.10 Hasil pengujian inverter sinusoidal dengan beban kipas angin

Daya (W)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Cos ϕ	Ma
40	20	3.4	220	0.24	0.45	0.7

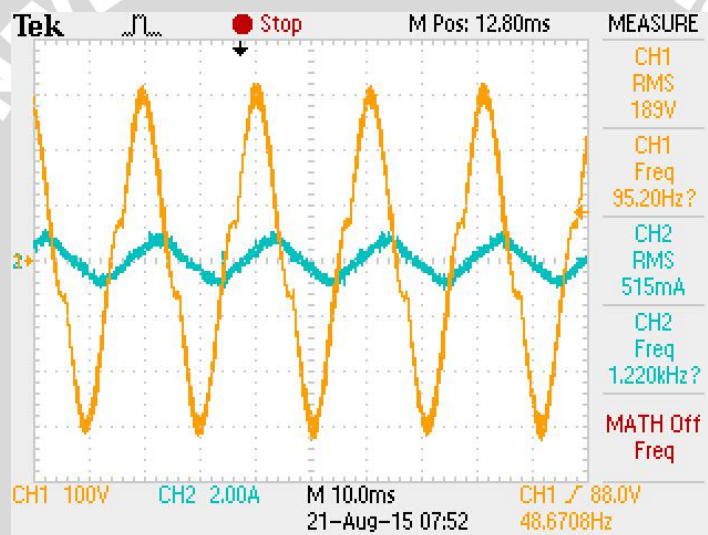
Dari hasil pengujian diperoleh kesimpulan yaitu ketika beban bertambah besar, maka nilai m_a semakin besar pula. Hal tersebut terjadi karena pada saat beban semakin besar, tegangan keluaran dari sistem semakin turun sehingga nilai m_a diperbesar agar nilai tegangan keluaran dapat mencapai nilai yang dibutuhkan beban yaitu sebesar 220 V. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada beban tersaji pada gambar dibawah ini.



Gambar 5.27 Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban bohlam 125W



Gambar 5.28 Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban CFL 50 W



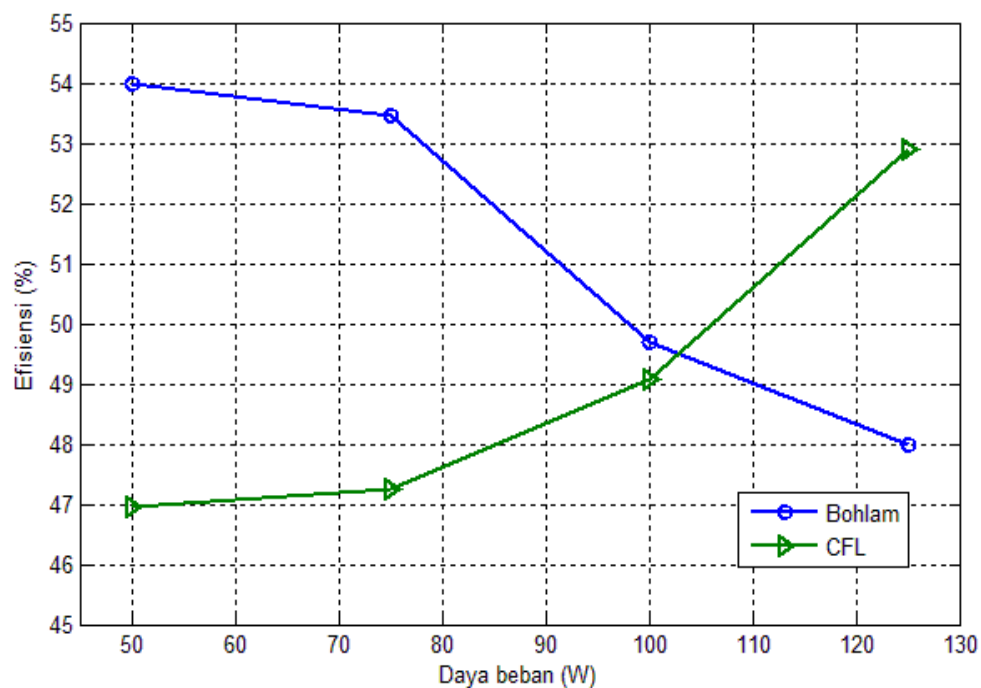
Gambar 5.29 Gelombang keluaran tegangan dan arus pada beban kipas angin

Dari hasil gelombang tegangan dan arus pada osiloskop pada beban bohlam memiliki gelombang yang berbentuk sinusoida. Sedangkan bentuk tegangan dan arus pada beban CFL memiliki bentuk gelombang sinusoida terdistorsi akibat dari CFL yang menimbulkan harmonisa. Sedangkan pada beban kipas angin memiliki sifat arus tertinggal terhadap tegangan (*lagging*) akibat dari penggunaan motor dan gelombang tegangan berbentuk sinusoida dengan sedikit distorsi.

Dari hasil pengujian berupa tegangan, arus, dan faktor daya sehingga kemudian dapat menganalisa efisiensi dari sistem inverter sinusoidal. Efisiensi pada ketiga jenis beban tersaji pada tabel 5.11.

Tabel 5.11 Efisiensi sistem pada tiap beban

Beban	Daya (W)	Pin	Pout	Efisiensi (%)
Bohlam	50	115	62.08	53.98
	75	145	77.52	53.46
	100	199.2	99	49.70
	125	247.5	118.8	48.00
CFL	50	117.3	55.08	46.96
	75	154.35	72.93	47.25
	100	208.8	102.465	49.07
	125	245.3	129.8	52.91
Kipas angin	40	68	23.76	34.94



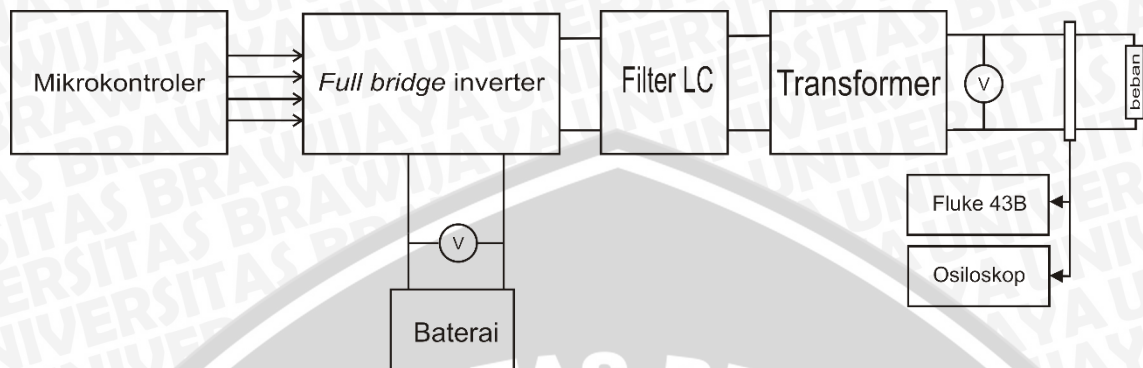
Gambar 5.30 Grafik efisiensi terhadap daya beban dengan beban bohlam dan CFL

Dari tabel efisiensi diatas diketahui jika sistem memiliki efisiensi tertinggi pada beban bohlam 50 W yaitu mencapai prosentase efisiensi sebesar 53.98%. Nilai efisiensi sistem rata-rata dibawah 50 persen disebabkan dari pemakaian transformator yang memiliki efisiensi cukup rendah.

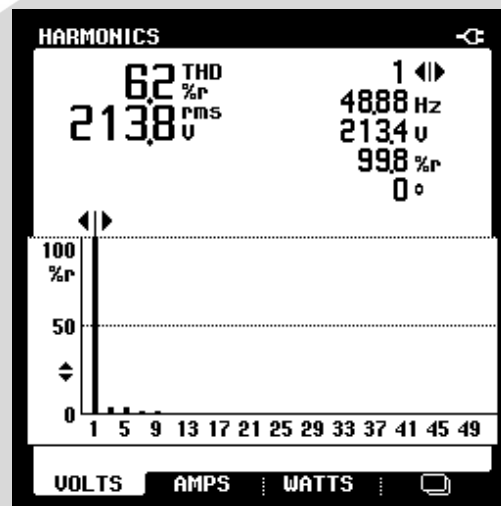
5.6.1 Pengujian THD dengan beban bervariasi

Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui bagaimana efek dari penggunaan *low pass* filter dalam meredam harmonisa pada frekuensi tinggi. Pada pengujian nilai THD yang terkandung pada sistem dengan beban bervariasi menggunakan fluke 43B.

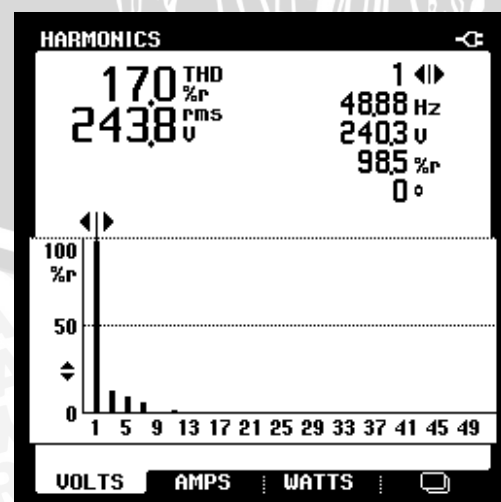
Pengujian masih tetap dengan beban yang sama yaitu dengan bohlam, CFL, dan kipas angin. Rangkaian pengujiannya ditunjukkan pada gambar 5.31.



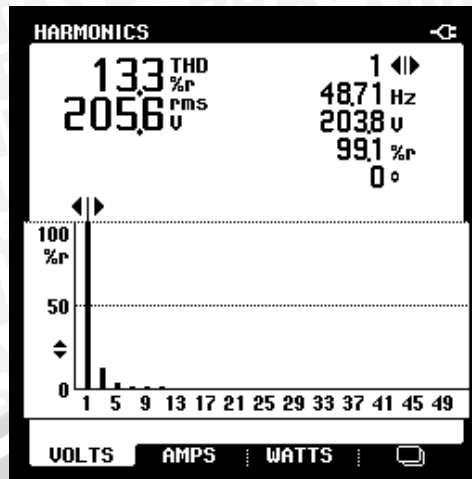
Gambar 5.31 Rangkaian pengujian THD pada sistem inverter satu fasa sinusoidal



Gambar 5.32 Pengujian THD pada beban bohlam 125 W



Gambar 5.33 Pengujian THD pada beban CFL 50 W



Gambar 5.34 Pengujian THD pada beban kipas angin 40 W

Tabel 5.12 Hasil pengujian THD pada sistem inverter satu fasa sinusoidal

Beban	Daya (W)	THD (%)
Bohlam	50	11.8
	75	8.4
	100	7.2
	125	6.2
CFL	50	17
	75	19.2
	100	22.7
	125	27.4
Kipas angin	40	13.3

Harmonisa pada orde tinggi sudah mampu diredam sehingga pengukuran THD pada fluke 43B mampu digunakan. Dari data yang diperoleh di atas dapat diambil kesimpulan yaitu semakin besar beban yang digunakan, maka nilai THD yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini berlawanan ketika beban yang dipakai adalah jenis CFL.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Dalam pembuatan sinyal *switching* dengan menggunakan *look up table* dengan bentuk sinyal *Sine Pulse Width Modulation* (SPWM) *unipolar switching* pada mikrokontroler ATmega16.
2. Pengendalian amplitudo tegangan keluaran pada sistem inverter satu fasa sinusoidal dapat dilakukan dengan pengaturan modulasi amplitudo (m_a). Semakin besar nilai modulasi amplitudo, maka semakin besar pula amplitudo tegangan keluaran pada rangkaian *full bridge* inverter.
3. *Low pass filter* hasil perancangan mampu meredam harmonisa pada frekuensi tinggi. Nilai THD pada inverter ketika diberi beban bohlam mencapai 6.2%.
4. Inverter satu fasa sinusoidal hasil dari perancangan telah mampu memenuhi beban mencapai 125 W. Efisiensi tertinggi pada saat diberi beban bohlam yaitu mencapai 53.98%.

6.2 Saran

Inverter nantinya dapat dikontrol dengan *feedback* berupa arus sehingga harmonisa yang dihasilkan dapat lebih rendah lagi. Sebaiknya pada perancangan inverter tidak menggunakan transformator agar menaikkan efisiensi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Khaled H. 2007. *Passive Filter Design For Three-Phase Inverter Interfacing In Distributed Generation*. UK: Strathclyde University.
- ATMEL. 2010. *8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash*. San Jose: ATMEL.
- Doucet, Jim. 2007. *DC/AC Pure Sine Wave Inverter*. Amerika: Worcester Polytechnic Institute.
- Hart, Daniel W. 2010. *Power Electronics*. India. Valparaiso University.
- International Rectifier. 2005. *High and Low Side Driver*. California: International Rectifier.
- Sardiyanto. 2011. *Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 volt*. Semarang: Universitas Dipenogoro.
- Sen, Pares C. 1996. *Principles of electric machines and power electronic*. Kanada: Queen's University.
- Utomo, Bobby W. 2011. *Perancangan dan Pembuatan Alat Inverter Satu Fasa Unipolar Pulse Width Modulation Switching untuk Laboratorium Elektronika Daya*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Yustisia, Lexi. 2011. *Rancang Bangun UPS Untuk Beban (900 VA) Berbasis Mikrokontroler*. Surabaya: PENS.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Listing program:

```

/*****
This program was produced by the
CodeWizardAVR V2.05.0 Professional
Automatic Program Generator
© Copyright 1998-2010 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
http://www.hpinfotech.com

Project : SPWM unipolar switching
Date    : 8/10/2015
Author  : Fadianto Mirza

Chip type      : ATmega16
Program type   : Application
AVR Core Clock frequency: 8.000000 MHz
Memory model   : Small
External RAM size : 0
Data Stack size : 256
*****/

#include <mega16.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>

int x=50, y=50;
bit i;

unsigned int SINEWAVE1[x]={
0, 96, 208, 304, 392, 496, 608, 672, 776, 864, 944, 1016, 1096, 1168,
1240, 1296, 1352, 1408, 1448, 1488, 1520, 1552, 1576, 1592, 1592,
1592, 1592, 1576, 1552, 1520, 1488, 1448, 1408, 1352, 1296, 1240,
1168,
1096, 1016, 944, 864, 776, 672, 608, 496, 392, 304, 208, 96};

unsigned int SINEWAVE2[x]={
0, 88, 200, 280, 376, 464, 520, 616, 672, 792, 856, 928, 992, 1040,
1120,
1184, 1216, 1256, 1328, 1344, 1392, 1416, 1424, 1432, 1432, 1448,
1432,
1432, 1424, 1416, 1392, 1344, 1328, 1256, 1216, 1184, 1120, 1040, 992,
928, 856, 792, 672, 616, 520, 464, 376, 280, 200, 88};

unsigned int SINEWAVE3[x]={
0, 80, 160, 240, 320, 400, 472, 544, 624, 688, 752, 816, 872, 944,
984,
1032, 1096, 1120, 1160, 1192, 1208, 1240, 1264, 1280, 1280, 1280,
1280,
1280, 1264, 1240, 1208, 1192, 1160, 1120, 1096, 1032, 984, 944, 872,
816,
752, 688, 624, 544, 472, 400, 320, 240, 160, 80};

unsigned int SINEWAVE4[x]={

```

```

0, 72, 144, 208, 264, 352, 408, 480, 528, 600, 656, 728, 752, 800,
856,
920, 952, 976, 1016, 1048, 1056, 1072, 1120, 1120, 1128, 1128, 1128,
1120,
1120, 1072, 1056, 1048, 1016, 976, 952, 920, 856, 800, 752, 728, 656,
600,
528, 480, 408, 352, 264, 208, 144, 72};

```

```
unsigned int SIN[x];
```

```
// Timer1 input capture interrupt service routine
interrupt [TIM1_CAPT] void timer1_capt_isr(void)
```

```
{
    if(x>=51){
        x=0;
        i=~i;
    }else x++;

```

```
OCR1A = SIN[x];
```

```
if(i==0){
    PORTD.4=1;
    PORTD.6=1;

```

```
    PORTD.5=0;
    PORTD.7=0;

```

```
}
else {
    PORTD.5=1;
    PORTD.7=1;

```

```
    PORTD.4=0;
    PORTD.6=0;

```

```
// Timer1 output compare A interrupt service routine
interrupt [TIM1_COMP] void timer1_compa_isr(void)
```

```
{
    if(i==0){
        PORTD.4=0;
        PORTD.6=0;
        PORTD.5=1;
    }

```

```
    else {
        PORTD.5=0;
        PORTD.7=0;
        PORTD.4=1;
    }

```

```
#define ADC_VREF_TYPE 0x60
```

```
// Read the AD conversion result
```

```
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
```

```
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    delay_us(5);
    ADCSRA|=0x40;
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCH;
}
```

```

// Declare your global variables here

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In
Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T
State0=T
PORTA=0x00;
DDRA=0x00;

// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In
Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T
State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0x00;

// Port C initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In
Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T
State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;

// Port D initialization
// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out
Func1=Out Func0=Out
// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0
State0=0
PORTD=0x00;
DDRD=0xFF;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
// Mode: Normal top=0xFF
// OC0 output: Disconnected
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 8000.000 kHz
// Mode: Fast PWM top=ICR1
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: On
// Compare A Match Interrupt: On
// Compare B Match Interrupt: Off

```

```
TCCR1A=0x02;
TCCR1B=0x19;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x06;
ICR1L=0x40;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: Off
// INT1: Off
// INT2: Off
MCUCR=0x00;
MCUCSR=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x30;

// USART initialization
// USART disabled
UCSRB=0x00;

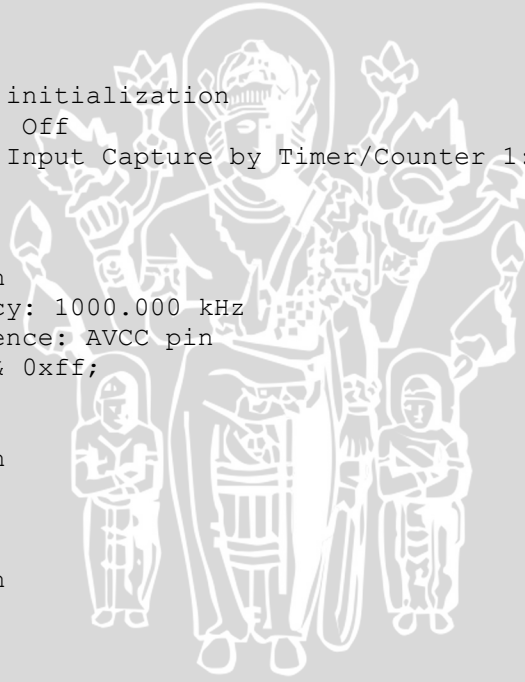
// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 1000.000 kHz
// ADC Voltage Reference: AVCC pin
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x87;

// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=0x00;

// TWI initialization
// TWI disabled
TWCR=0x00;

// Global enable interrupts
#asm("sei")
while (1)
{
    if(read_adc(0)<70){
        TIMSK=0x00;
        PORTD.5=0;
        PORTD.7=0;
        PORTD.4=0;
        PORTD.6=0;
    }
    else
```



```
{
    TIMSK=0x30;
    if(read_adc(0)<110) for(y=0;y<50;y++) SIN[y] = SINEWAVE4[y];
    else if(read_adc(0)<150) for(y=0;y<50;y++) SIN[y] =
SINEWAVE3[y];
    else if(read_adc(0)<190) for(y=0;y<50;y++) SIN[y] =
SINEWAVE2[y];
    else if(read_adc(0)<255) for(y=0;y<50;y++) SIN[y] =
SINEWAVE1[y];
}
}
```



Lampiran 2

Tabel 7.1 *Look up table* dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 1$)

m	Waktu (us)	α	$(-1)^m x \frac{\alpha_m}{\pi}$	$(-1)^{(m+1)} x \cos \alpha_m$
1	194	3.492	-0.0194	0.998143313
2	206	3.708	0.0206	-0.997906598
3	387	6.966	-0.0387	0.992618296
4	413	7.434	0.0413	-0.991594559
5	582	10.476	-0.0582	0.983331156
6	620	11.16	0.062	-0.981090517
7	776	13.968	-0.0776	0.97043069
8	825	14.85	0.0825	-0.966600102
9	970	17.46	-0.097	0.953926651
10	1032	18.576	0.1032	-0.947901932
11	1164	20.952	-0.1164	0.933880324
12	1240	22.32	0.124	-0.925077207
13	1360	24.48	-0.136	0.910105971
14	1444	25.992	0.1444	-0.898855246
15	1553	27.954	-0.1553	0.883324224
16	1650	29.7	0.165	-0.868631514
17	1747	31.446	-0.1747	0.853132229
18	1855	33.39	0.1855	-0.834943928
19	1942	34.956	-0.1942	0.819592278
20	2060	37.08	0.206	-0.79779444
21	2138	38.484	-0.2138	0.782781965
22	2265	40.77	0.2265	-0.757337082
23	2333	41.994	-0.2333	0.743214893
24	2470	44.46	0.247	-0.713739602
25	2528	45.504	-0.2528	0.700859468
26	2674	48.132	0.2674	-0.667416749
27	2724	49.032	-0.2724	0.655637417
28	2879	51.822	0.2879	-0.618106602
29	2920	52.56	-0.292	0.607930298
30	3082	55.476	0.3082	-0.566751396
31	3117	56.106	-0.3117	0.557658187
32	3286	59.148	0.3286	-0.512822221
33	3313	59.634	-0.3313	0.505521849
34	3489	62.802	0.3489	-0.45706688
35	3511	63.198	-0.3511	0.450908698
36	3692	66.456	0.3692	-0.399453203
37	3708	66.744	-0.3708	0.39484007
38	3894	70.092	0.3894	-0.340510836
39	3906	70.308	-0.3906	0.336963801
40	4096	73.728	0.4096	-0.280197626
41	4104	73.872	-0.4104	0.277784145
42	4298	77.364	0.4298	-0.218756385
43	4302	77.436	-0.4302	0.217530012
44	4499	80.982	0.4499	-0.156744749
45	4500	81	-0.45	0.156434465
46	4699	84.582	0.4699	-0.094421074
47	4700	84.6	-0.47	0.094108313
48	4899	88.182	0.4899	-0.031724762
49	4900	88.2	-0.49	0.031410759
50	5099	91.782	0.5099	0.031096753

51	5100	91.8	-0.51	-0.031410759
52	5299	95.382	0.5299	0.093795544
53	5300	95.4	-0.53	-0.094108313
54	5499	98.982	0.5499	0.156124166
55	5501	99.018	-0.5501	-0.156744749
56	5698	102.564	0.5698	0.217530012
57	5702	102.636	-0.5702	-0.218756385
58	5896	106.128	0.5896	0.277784145
59	5904	106.272	-0.5904	-0.280197626
60	6094	109.692	0.6094	0.336963801
61	6106	109.908	-0.6106	-0.340510836
62	6292	113.256	0.6292	0.39484007
63	6309	113.562	-0.6309	-0.39974119
64	6490	116.82	0.649	0.451189084
65	6512	117.216	-0.6512	-0.457346281
66	6688	120.384	0.6688	0.505792885
67	6715	120.87	-0.6715	-0.5130919
68	6884	123.912	0.6884	0.557918934
69	6918	124.524	-0.6918	-0.566751396
70	7080	127.44	0.708	0.607930298
71	7121	128.178	-0.7121	-0.618106602
72	7276	130.968	0.7276	0.655637417
73	7326	131.868	-0.7326	-0.667416749
74	7472	134.496	0.7472	0.700859468
75	7529	135.522	-0.7529	-0.713519526
76	7666	137.988	0.7666	0.743004667
77	7734	139.212	-0.7734	-0.757131891
78	7861	141.498	0.7861	0.782586427
79	7939	142.902	-0.7939	-0.797604984
80	8057	145.026	0.8057	0.819412241
81	8144	146.592	-0.8144	-0.834770994
82	8252	148.536	0.8252	0.852968292
83	8350	150.3	-0.835	-0.868631514
84	8447	152.046	0.8447	0.883324224
85	8555	153.99	-0.8555	-0.898717522
86	8639	155.502	0.8639	0.909975746
87	8761	157.698	-0.8761	-0.925196472
88	8837	159.066	0.8837	0.933992617
89	8969	161.442	-0.8969	-0.948001965
90	9031	162.558	0.9031	0.954020864
91	9175	165.15	-0.9175	-0.966600102
92	9224	166.032	0.9224	0.97043069
93	9381	168.858	-0.9381	-0.981151274
94	9419	169.542	0.9419	0.983388229
95	9586	172.548	-0.9586	-0.991553863
96	9612	173.016	0.9612	0.992580145
97	9793	176.274	-0.9793	-0.997886232
98	9805	176.49	0.9805	0.998124128

Nilai $m_a = 1$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_{dc} \times \left(\sum_{m=1}^p \frac{(-1)^{m+1} \cos \alpha_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 26 \times (0,638)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 20,75
 \end{aligned}$$

Tabel 7.2 *Look up table* dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0.9$)

m	Waktu (us)	α	$(-1)^m x \frac{\alpha_m}{\pi}$	$(-1)^{(m+1)} x \cos \alpha_m$
1	193	3.474	-0.0193	0.998162399
2	204	3.672	0.0204	-0.997947036
3	386	6.948	-0.0386	0.992656348
4	411	7.398	0.0411	-0.991675658
5	582	10.476	-0.0582	0.983331156
6	617	11.106	0.0617	-0.981272498
7	776	13.968	-0.0776	0.97043069
8	823	14.814	0.0823	-0.966760943
9	971	17.478	-0.0971	0.953832343
10	1029	18.522	0.1029	-0.948201749
11	1167	21.006	-0.1167	0.933542893
12	1232	22.176	0.1232	-0.926028773
13	1362	24.516	-0.1362	0.909845431
14	1439	25.902	0.1439	-0.899542531
15	1557	28.026	-0.1557	0.882734463
16	1641	29.538	0.1641	-0.870028917
17	1750	31.5	-0.175	0.852640164
18	1849	33.282	0.1849	-0.835979801
19	1946	35.028	-0.1946	0.818871644
20	2053	36.954	0.2053	-0.799118421
21	2144	38.592	-0.2144	0.781607575
22	2260	40.68	0.226	-0.758361915
23	2339	42.102	-0.2339	0.741952438
24	2463	44.334	0.2463	-0.71527816
25	2537	45.666	-0.2537	0.698839863
26	2667	48.006	0.2667	-0.669052781
27	2730	49.14	-0.273	0.654212969
28	2870	51.66	0.287	-0.620326758
29	2928	52.704	-0.2928	0.605932864
30	3076	55.368	0.3076	-0.568303383
31	3124	56.232	-0.3124	0.555831419
32	3276	58.968	0.3276	-0.515516727
33	3322	59.796	-0.3322	0.503080283
34	3479	62.622	0.3479	-0.459858854
35	3519	63.342	-0.3519	0.448664003
36	3685	66.33	0.3685	-0.401468282
37	3717	66.906	-0.3717	0.392240791
38	3885	69.93	0.3885	-0.343167939
39	3913	70.434	-0.3913	0.334892483
40	4087	73.566	0.4087	-0.282910675
41	4110	73.98	-0.411	0.275972883
42	4287	77.166	0.4287	-0.222127124
43	4310	77.58	-0.431	0.215076237
44	4488	80.784	0.4488	-0.160156842
45	4512	81.216	-0.4512	0.152709865
46	4691	84.438	0.4691	-0.096922819
47	4711	84.798	-0.4711	0.090667343
48	4890	88.02	0.489	-0.034550641
49	4910	88.38	-0.491	0.028270567
50	5091	91.638	0.5091	0.028584599

51	5111	91.998	-0.5111	-0.034864611
52	5290	95.22	0.529	0.090980204
53	5311	95.598	-0.5311	-0.09754816
54	5490	98.82	0.549	0.153330784
55	5512	99.216	-0.5512	-0.160156842
56	5690	102.42	0.569	0.215076237
57	5713	102.834	-0.5713	-0.222127124
58	5890	106.02	0.589	0.275972883
59	5912	106.416	-0.5912	-0.282609337
60	6086	109.548	0.6086	0.334596447
61	6116	110.088	-0.6116	-0.343463004
62	6284	113.112	0.6284	0.392529755
63	6316	113.688	-0.6316	-0.401755992
64	6482	116.676	0.6482	0.448944745
65	6521	117.378	-0.6521	-0.459858854
66	6678	120.204	0.6678	0.503080283
67	6723	121.014	-0.6723	-0.515247505
68	6875	123.75	0.6875	0.555570233
69	6925	124.65	-0.6925	-0.568561851
70	7073	127.314	0.7073	0.606182753
71	7129	128.322	-0.7129	-0.620080319
72	7269	130.842	0.7269	0.653975335
73	7334	132.012	-0.7334	-0.669286236
74	7464	134.352	0.7464	0.69906454
75	7536	135.648	-0.7536	-0.715058577
76	7660	137.88	0.766	0.741741773
77	7742	139.356	-0.7742	-0.758771325
78	7858	141.444	0.7858	0.781999347
79	7944	142.992	-0.7944	-0.798551473
80	8051	144.918	0.8051	0.81833032
81	8150	146.7	-0.815	-0.835807361
82	8249	148.482	0.8249	0.852475975
83	8359	150.462	-0.8359	-0.870028917
84	8443	151.974	0.8443	0.882734463
85	8561	154.098	-0.8561	-0.899542531
86	8638	155.484	0.8638	0.909845431
87	8767	157.806	-0.8767	-0.925910147
88	8832	158.976	0.8832	0.933430232
89	8970	161.46	-0.897	-0.948101904
90	9028	162.504	0.9028	0.953737942
91	9176	165.168	-0.9176	-0.96668057
92	9223	166.014	0.9223	0.97035481
93	9382	168.876	-0.9382	-0.981211934
94	9417	169.506	0.9417	0.983273986
95	9587	172.566	-0.9587	-0.991594559
96	9612	173.016	0.9612	0.992580145
97	9797	176.346	-0.9797	-0.997967107
98	9808	176.544	0.9808	0.998181386

Nilai $m_a = 0,9$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_{dc} \times \left(\sum_{m=1}^p \frac{(-1)^{m+1} \cos \alpha_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 26 \times (0,577)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 19,75
 \end{aligned}$$

Tabel 7.3 Look up table dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0.8$)

m	Waktu (us)	α	$(-1)^m x \frac{\alpha_m}{\pi}$	$(-1)^{(m+1)} x \cos \alpha_m$
1	195	3.51	-0.0195	0.998124128
2	205	3.69	0.0205	-0.997926866
3	390	7.02	-0.039	0.992503551
4	410	7.38	0.041	-0.99171606
5	585	10.53	-0.0585	0.983159354
6	615	11.07	0.0615	-0.981393334
7	780	14.04	-0.078	0.970126596
8	820	14.76	0.082	-0.967001488
9	975	17.55	-0.0975	0.953454172
10	1025	18.45	0.1025	-0.948600195
11	1171	21.078	-0.1171	0.933091695
12	1230	22.14	0.123	-0.926265751
13	1367	24.606	-0.1367	0.909192511
14	1435	25.83	0.1435	-0.900090762
15	1562	28.116	-0.1562	0.8819953
16	1640	29.52	0.164	-0.870183755
17	1758	31.644	-0.1758	0.851324291
18	1844	33.192	0.1844	-0.83684076
19	1954	35.172	-0.1954	0.817426499
20	2048	36.864	0.2048	-0.800061756
21	2150	38.7	-0.215	0.780430407
22	2252	40.536	0.2252	-0.759997755
23	2346	42.228	-0.2346	0.740476243
24	2455	44.19	0.2455	-0.717032275
25	2542	45.756	-0.2542	0.697715445
26	2660	47.88	0.266	-0.670685577
27	2740	49.32	-0.274	0.651833725
28	2863	51.534	0.2863	-0.622050118
29	2936	52.848	-0.2936	0.603931603
30	3065	55.17	0.3065	-0.571143442
31	3133	56.394	-0.3133	0.55347877
32	3270	58.86	0.327	-0.51713099
33	3331	59.958	-0.3331	0.500634695
34	3471	62.478	0.3471	-0.462089167
35	3528	63.504	-0.3528	0.446135334
36	3673	66.114	0.3673	-0.40491818
37	3726	67.068	-0.3726	0.389638376
38	3875	69.75	0.3875	-0.346117057
39	3925	70.65	-0.3925	0.331337888
40	4076	73.368	0.4076	-0.286223551
41	4123	74.214	-0.4123	0.272045125
42	4278	77.004	0.4278	-0.22488303
43	4322	77.796	-0.4322	0.211393032
44	4480	80.64	0.448	-0.162637165
45	4520	81.36	-0.452	0.150225589
46	4680	84.24	0.468	-0.100361715
47	4720	84.96	-0.472	0.087851197
48	4880	87.84	0.488	-0.037690183
49	4920	88.56	-0.492	0.025130095
50	5080	91.44	0.508	0.025130095

51	5120	92.16	-0.512	-0.037690183
52	5280	95.04	0.528	0.087851197
53	5320	95.76	-0.532	-0.100361715
54	5480	98.64	0.548	0.150225589
55	5522	99.396	-0.5522	-0.163257086
56	5680	102.24	0.568	0.21200711
57	5723	103.014	-0.5723	-0.225189131
58	5878	105.804	0.5878	0.272347422
59	5924	106.632	-0.5924	-0.286223551
60	6075	109.35	0.6075	0.331337888
61	6124	110.232	-0.6124	-0.345822299
62	6273	112.914	0.6273	0.389349027
63	6326	113.868	-0.6326	-0.404630908
64	6471	116.478	0.6471	0.44585415
65	6530	117.54	-0.653	-0.462367751
66	6670	120.06	0.667	0.500906625
67	6730	121.14	-0.673	-0.51713099
68	6867	123.606	0.6867	0.55347877
69	6937	124.866	-0.6937	-0.571659085
70	7066	127.188	0.7066	0.604432277
71	7137	128.466	-0.7137	-0.622050118
72	7260	130.68	0.726	0.651833725
73	7339	132.102	-0.7339	-0.670452518
74	7457	134.226	0.7457	0.697490355
75	7545	135.81	-0.7545	-0.717032275
76	7654	137.772	0.7654	0.740476243
77	7748	139.464	-0.7748	-0.759997755
78	7850	141.3	0.785	0.780430407
79	7952	143.136	-0.7952	-0.800061756
80	8046	144.828	0.8046	0.817426499
81	8156	146.808	-0.8156	-0.83684076
82	8242	148.356	0.8242	0.851324291
83	8359	150.462	-0.8359	-0.870028917
84	8437	151.866	0.8437	0.881847207
85	8565	154.17	-0.8565	-0.900090762
86	8633	155.394	0.8633	0.909192511
87	8769	157.842	-0.8769	-0.926147308
88	8828	158.904	0.8828	0.932978665
89	8974	161.532	-0.8974	-0.948500724
90	9024	162.432	0.9024	0.953359394
91	9180	165.24	-0.918	-0.967001488
92	9220	165.96	0.922	0.970126596
93	9385	168.93	-0.9385	-0.981393334
94	9415	169.47	0.9415	0.983159354
95	9590	172.62	-0.959	-0.99171606
96	9610	172.98	0.961	0.992503551
97	9795	176.31	-0.9795	-0.997926866
98	9805	176.49	0.9805	0.998124128

Nilai $m_a = 0,8$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_{dc} \times \left(\sum_{m=1}^p \frac{(-1)^{m+1} \cos \alpha_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 26 \times (0,51)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 18,57
 \end{aligned}$$

Tabel 7.4 *Look up table* dan perhitungan tegangan keluaran ($m_a = 0.7$)

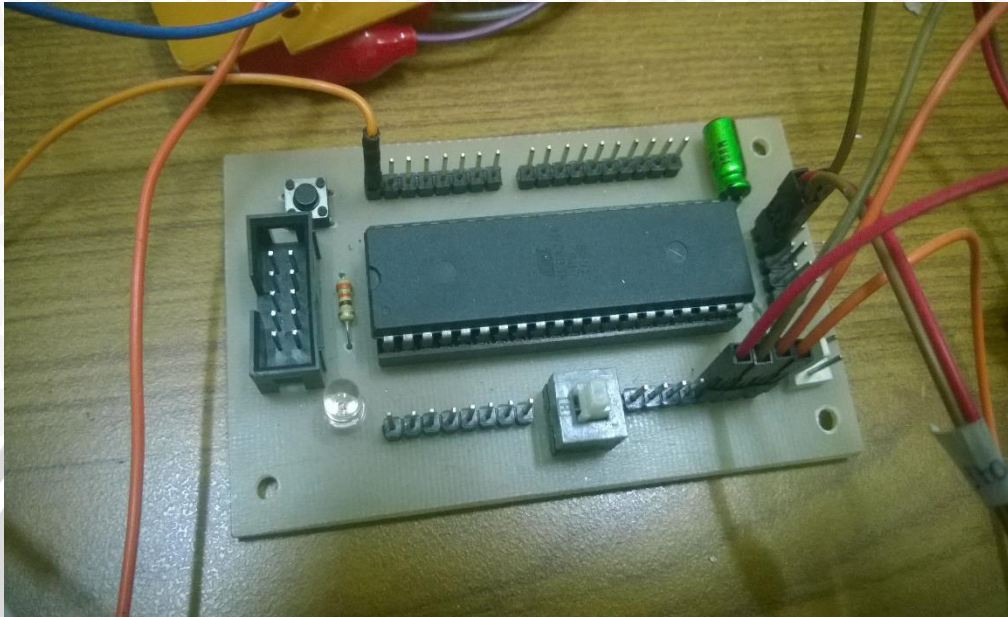
m	Waktu (us)	α	$(-1)^m x \frac{\alpha_m}{\pi}$	$(-1)^{(m+1)} x \cos \alpha_m$
1	196	3.528	-0.0196	0.998
2	205	3.69	0.0205	-0.998
3	390	7.02	-0.039	0.993
4	408	7.344	0.0408	-0.992
5	587	10.566	-0.0587	0.983
6	613	11.034	0.0613	-0.982
7	783	14.094	-0.0783	0.970
8	816	14.688	0.0816	-0.967
9	978	17.604	-0.0978	0.953
10	1022	18.396	0.1022	-0.949
11	1175	21.15	-0.1175	0.933
12	1226	22.068	0.1226	-0.927
13	1370	24.66	-0.137	0.909
14	1430	25.74	0.143	-0.901
15	1567	28.206	-0.1567	0.881
16	1633	29.394	0.1633	-0.871
17	1764	31.752	-0.1764	0.850
18	1839	33.102	0.1839	-0.838
19	1960	35.28	-0.196	0.816
20	2042	36.756	0.2042	-0.801
21	2156	38.808	-0.2156	0.779
22	2247	40.446	0.2247	-0.761
23	2353	42.354	-0.2353	0.739
24	2447	44.046	0.2447	-0.719
25	2551	45.918	-0.2551	0.696
26	2651	47.718	0.2651	-0.673
27	2746	49.428	-0.2746	0.650
28	2853	51.354	0.2853	-0.625
29	2942	52.956	-0.2942	0.602
30	3057	55.026	0.3057	-0.573
31	3141	56.538	-0.3141	0.551
32	3260	58.68	0.326	-0.520
33	3339	60.102	-0.3339	0.498
34	3461	62.298	0.3461	-0.465
35	3537	63.666	-0.3537	0.444
36	3664	65.952	0.3664	-0.408
37	3735	67.23	-0.3735	0.387
38	3866	69.588	0.3866	-0.349
39	3935	70.83	-0.3935	0.328
40	4067	73.206	0.4067	-0.289
41	4133	74.394	-0.4133	0.269
42	4267	76.806	0.4267	-0.228
43	4330	77.94	-0.433	0.209
44	4470	80.46	0.447	-0.166
45	4529	81.522	-0.4529	0.147
46	4669	84.042	0.4669	-0.104
47	4729	85.122	-0.4729	0.085
48	4870	87.66	0.487	-0.041
49	4928	88.704	-0.4928	0.023
50	5069	91.242	0.5069	0.022

51	5129	92.322	-0.5129	-0.041
52	5270	94.86	0.527	0.085
53	5330	95.94	-0.533	-0.103
54	5470	98.46	0.547	0.147
55	5531	99.558	-0.5531	-0.166
56	5671	102.078	0.5671	0.209
57	5733	103.194	-0.5733	-0.228
58	5867	105.606	0.5867	0.269
59	5933	106.794	-0.5933	-0.289
60	6065	109.17	0.6065	0.328
61	6134	110.412	-0.6134	-0.349
62	6265	112.77	0.6265	0.387
63	6336	114.048	-0.6336	-0.408
64	6463	116.334	0.6463	0.444
65	6538	117.684	-0.6538	-0.465
66	6660	119.88	0.666	0.498
67	6739	121.302	-0.6739	-0.520
68	6858	123.444	0.6858	0.551
69	6941	124.938	-0.6941	-0.573
70	7056	127.008	0.7056	0.602
71	7146	128.628	-0.7146	-0.624
72	7253	130.554	0.7253	0.650
73	7349	132.282	-0.7349	-0.673
74	7449	134.082	0.7449	0.696
75	7552	135.936	-0.7552	-0.719
76	7646	137.628	0.7646	0.739
77	7754	139.572	-0.7754	-0.761
78	7845	141.21	0.7845	0.779
79	7960	143.28	-0.796	-0.802
80	8042	144.756	0.8042	0.817
81	8162	146.916	-0.8162	-0.838
82	8237	148.266	0.8237	0.850
83	8366	150.588	-0.8366	-0.871
84	8432	151.776	0.8432	0.881
85	8569	154.242	-0.8569	-0.901
86	8629	155.322	0.8629	0.909
87	8774	157.932	-0.8774	-0.927
88	8825	158.85	0.8825	0.933
89	8978	161.604	-0.8978	-0.949
90	9022	162.396	0.9022	0.953
91	9183	165.294	-0.9183	-0.967
92	9216	165.888	0.9216	0.970
93	9387	168.966	-0.9387	-0.982
94	9413	169.434	0.9413	0.983
95	9591	172.638	-0.9591	-0.992
96	9609	172.962	0.9609	0.992
97	9795	176.31	-0.9795	-0.998
98	9804	176.472	0.9804	0.998

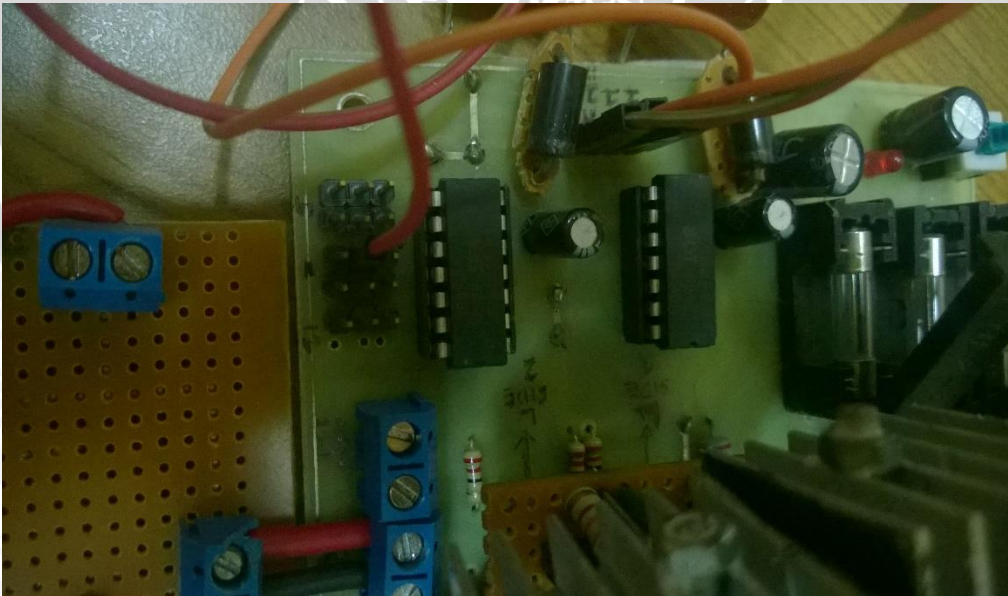
Nilai $m_a = 0,7$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_{dc} \times \left(\sum_{m=1}^p \frac{(-1)^{m+1} \cos \alpha_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 26 \times (0,445)^{\frac{1}{2}} \\
 &= 17,3
 \end{aligned}$$

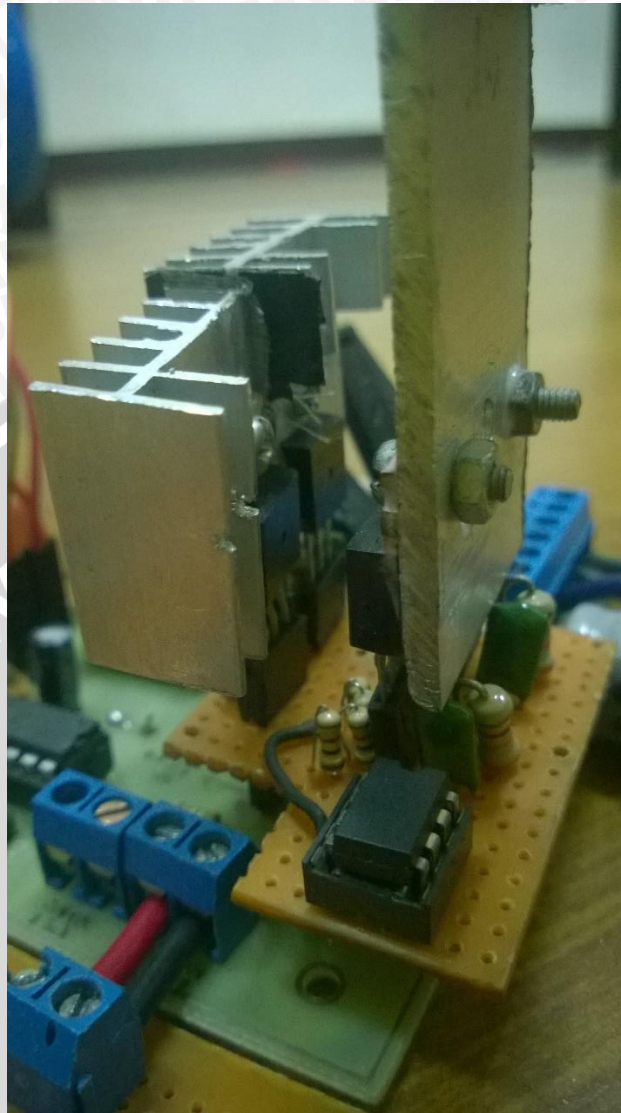
Lampiran 3



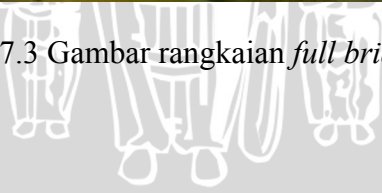
Gambar 7.1 Gambar rangkaian ATmega16



Gambar 7.2 Gambar rangkaian driver MOSFET IR2110



Gambar 7.3 Gambar rangkaian *full bridge*



Lampiran 4

Berisi tentang *datasheet* dari beberapa komponen penyusun alat, yaitu :

1. Mikrokontroler AT Mega 16
2. MOSFET IRF3710
3. IR2110

