



**TUGAS AKHIR-TE 141599**

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER  
RESONAN AC-AC DENGAN *ZCS (ZERO CURRENT  
SWITCHING)* UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI**

Muhammad Abdika Azzakiy  
NRP 2212 100 179

Dosen Pembimbing  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT-TE 141599**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AC-AC RESONANT  
CONVERTER WITH ZCS (ZERO CURRENT SWITCHING)  
FOR INDUCTION HEATING APPLICATION**

Muhammad Abdika Azzakiy  
NRP 2212 100 179

Advisor  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI  
KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS  
(ZERO CURRENT SWITCHING) UNTUK APLIKASI  
PEMANASAN INDUKSI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing 1**

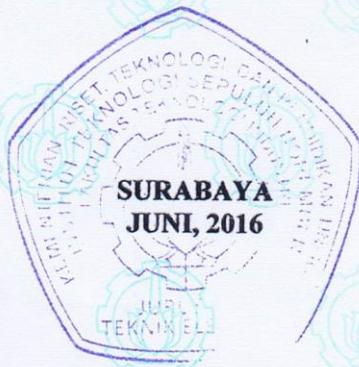


**Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.**  
**NIP. 198006032006041003**

**Dosen Pembimbing 2**



**Ir. Sjamiul Anam, MT.**  
**NIP. 196307251990031002**



# **PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS (*ZERO CURRENT SWITCHING*) UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI**

Muhammad Abdika Azzakiy  
2212100179

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

## **ABSTRAK**

Teknologi pemanasan induksi membutuhkan fitur-fitur khusus seperti output daya yang tinggi, temperatur pemanasan yang sesuai kebutuhan, variasi beban yang besar, dan biaya pembuatan yang minim. Untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan tersebut rangkaian pemanasan induksi klasik yang bekerja berdasarkan *rectifier* dan *dc-link inverter* sudah cukup baik dalam memenuhi fitur-fitur diatas. Akan tetapi masih terdapat kekurangan yaitu pada masalah efisiensi dan biaya pengembangan. Oleh karenanya pada tugas akhir kali ini akan didesain dan diimplementasikan *Direct AC-AC Resonant Converter* dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk mengurangi komponen yang digunakan, menekan biaya, menambah keandalan, dan meningkatkan efisiensi. Konverter ini merupakan *voltage source series-resonant converter*, direncanakan memiliki daya *output* yang linier dengan frekuensinya dan memiliki kontrol frekuensi yang tidak terlalu kompleks. Lebih jauh lagi konverter ini akan mencapai *soft switching* selama transisi dari *turn-on* dan *turn-off* dan memiliki daya output hingga sekitar 110 W. Rencananya konverter ini akan digunakan untuk salah satu aplikasi pemanasan induksi yaitu kompor listrik. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur frekuensi agar dapat menghasilkan *output* daya yang diinginkan. Untuk mengatur frekuensi *switching* pada *switch* di konverter rencananya akan digunakan PWM yang dibangkitkan dengan mikrokontroler dan dikuatkan dengan *gate driver*. Untuk Inputnya akan digunakan tegangan dari catu daya AC hingga sebesar 100 V, 50 Hz.

**Kata kunci : Pemanasan Induksi, Konverter AC-AC Langsung,  
Topologi Konverter Resonan (*Zero Current Switching*),  
PWM (*Pulse Width Modulation*)**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AC-AC RESONANT CONVERTER WITH ZCS (ZERO CURRENT SWITCHING) FOR INDUCTION HEATING APPLICATION**

Muhammad Abdika Azzakiy  
2212100179

1<sup>st</sup> Advisor : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.  
2<sup>nd</sup> Advisor : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

## ***ABSTRACT***

*Induction heating technology require a special features such as high power output, the heating temperature according to the needs, a large load variations, and minimal manufacturing costs. To occupy these needs, classical induction heating circuit works based rectifier and inverter dc-link is good enough to occupy the above features. However, there are still shortcomings, especially the issue of efficiency and development costs. Therefore in this final project, will be designed and implemented Direct AC-AC Converter with ZCS (Zero Current Switching) to reduce the components used, reduce costs, increase reliability, and improve efficiency. This converter is a voltage source series-resonant converter, and planned has a linear output power with frequency and has a frequency control that is not too complex. Furthermore this converter will achieve soft switching during the transition from turn-on and turn-off and has a power output of up to 110 W. The converters is planned to be used for one application of induction heating, specifically electric stove. This can be done by adjusting the frequency in order to produce the desired power output. To set the switching frequency of the switches in this converter will be used PWM generated by a microcontroller and strengthened by gate driver. The input will be used voltages up to 100 V from AC power supply, and with 50 Hz frequency.*

***Keywords : Induction Heating, Direct AC-AC Converter, Resonant Converter Topology (Zero Current Switching), PWM (Pulse Width Modulation)***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	5
<b>BAB 2 KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS (ZERO CURRENT SWITCHING) UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI DAN STRATEGI PENSAKLARAN</b>	
2.1 Pemanasan Induksi .....	7
2.2 Konverter Resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .....	9
2.3 Analisa Efisiensi .....	12
2.3.1 Rugi-Rugi Konduksi .....	12
2.3.2 Rugi-Rugi Switching .....	13
2.4 <i>Resonant Converter (Zero Current Switching)</i> .....	13
2.4.1 <i>Zero Current Switching (ZCS)</i> .....	14
2.5 Pulse Width Modulation (PWM) .....	15

### **BAB 3 PERANCANGAN KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS (ZERO CURRENT SWITCHING) UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI**

3.1	Blok Diagram Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	17
3.2	Perancangan Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	18
3.3	Perancangan Beban Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	19
3.4	Penentuan Komponen Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	22
3.4.1	Penentuan Kapasitor Resonan (Cr).....	22
3.4.2	Penentuan IGBT .....	23
3.4.3	Penentuan Dioda.....	24
3.4.4	Penentuan Filter Input (Cs dan Ls).....	24
3.5	Perancangan <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) .....	25
3.6	Perancangan <i>Gate Driver</i> PWM.....	26
3.7	Kesimpulan Desain dan Spesifikasi Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	28
3.8	Simulasi dan Perhitungan Manual Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi.....	28

### **BAB 4 HASIL UJICOBAN DAN ANALISIS DATA**

4.1	Pengambilan Data Grafis Hasil Uji Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .....	34
4.1.1	Hasil Pengujian Sinyal PWM .....	34
4.1.2	Hasil Pengujian Gelombang Input .....	36
4.1.3	Hasil Pengujian Gelombang Dioda.....	36
4.1.4	Hasil Pengujian Gelombang IGBT.....	37
4.1.5	Hasil Pengujian Gelombang Kapasitor.....	37
4.1.6	Hasil Pengujian Gelombang Output .....	38

4.2 Hasil Pengujian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .	40
4.2.1 Hasil Analisa Pegujian Daya dan Kinerja Konverter .....	40
4.2.2 Hasil Analisa Tegangan Puncak Output (VCr) .....	43
4.3 Analisa Perbandingan Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi dengan Konverter Lain ( <i>Non ZCS</i> ) untuk Aplikasi Pemanas Induksi .....	44
 <b>BAB 5 PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	47
5.2 Saran .....	47
 <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	49
<b>LAMPIRAN</b> .....	51
<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b> .....	53

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi bagaimana pemanas induksi bekerja : (a) tampak samping (b) tampak atas .....	7
Gambar 2.2	(a) Skema rangkaian pemanas induksi menggunakan <i>rectifier</i> dan inverter (b) Skema rangkaian pemanas induksi menggunakan konverter AC-AC langsung ....	8
Gambar 2.3	Topologi rangkaian konverter resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk aplikasi pemanasan induksi.....	9
Gambar 2.4	Mode kerja konverter resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk aplikasi pemanasan induksi .....	10
Gambar 2.5	Bentuk gelombang <i>switching</i> utama konverter terhadap tegangan suplai .....	12
Gambar 2.6	Gelombang arus dan tegangan saat <i>hard switching</i> dan <i>resonant switching</i> .....	14
Gambar 2.7	Topologi dan gelombang dari <i>Zero Current Switching (ZCS)</i> .....	15
Gambar 2.8	Rangkaian Penghasil PWM .....	15
Gambar 2.9	Cara Kerja PWM .....	16
Gambar 2.10	Persamaan-persamaan PWM .....	16
Gambar 3.1	Blok diagram rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .....	17
Gambar 3.2	Flowchart perancangan rangkaian konverter resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk aplikasi pemanasan induksi .....	18
Gambar 3.3	Ilustrasi rancangan beban pada kompor induksi .....	20
Gambar 3.4	Foto dari beban yang diimplementasikan .....	22
Gambar 3.5	Jenis kapasitor mylar tegangan tinggi yang digunakan pada konverter .....	23
Gambar 3.6	IGBT IGW60T120 .....	24
Gambar 3.7	Dioda MUR 1560 .....	24
Gambar 3.8	(a) Filter $C_s$ yang digunakan merupakan jenis kapasitorteflon (b) Ilustrasi jenis filter $L_s$ yang akan digunakan merupakan induktor toroida .....	25
Gambar 3.9	Arduino Mega.....	26
Gambar 3.10	(a) Skematik TLP 250 (b) Konfigurasi pin TLP 250 ..	27

Gambar 3.11	Rangkaian simulasi dengan PSIM Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (Zero Current Switching) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .....	29
Gambar 3.12	Bentuk tegangan input dan tegangan dioda hasil simulasi PSIM .....	29
Gambar 3.13	Bentuk tegangan kapasitor, tegangan IGBT, tegangan output, dan arus output hasil simulasi PSIM .....	30
Gambar 3.14	Tegangan kapasitor, IGBT, tegangan output, dan arus output dan pada skala yang lebih besar .....	30
Gambar 4.1	Implementasi dari rangkaian konverter resonan AC-AC dengan ZCS ( <i>Zero Current Switching</i> ) untuk aplikasi pemanasan induksi .....	33
Gambar 4.2	(a) Bentuk gelombang sinyal PWM yang dibangkitkan dari Arduino Mega 2560 (b) Bentuk gelombang sinyal PWM setelah diperkuat dengan rangkaian <i>gate driver</i> TLP 250 .....	35
Gambar 4.3	Grafik berwarna biru merupakan tegangan input konverter .....	36
Gambar 4.4	Bentuk tegangan dioda (biru) terhadap IGBT .....	36
Gambar 4.5	Bentuk tegangan IGBT (kuning) terhadap tegangan output .....	37
Gambar 4.6	Bentuk tegangan kapasitor resonan (biru) terhadap switch .....	37
Gambar 4.7	(a) Bentuk tegangan output (biru) terhadap IGBT (b) Bentuk arus output (ungu) terhadap IGBT .....	38
Gambar 4.8	Gelombang arus (bawah) dan tegangan (atas) output pada frekuensi yang lebih tinggi (50 kHz) .....	39
Gambar 4.9	Tegangan (atas) dan arus output (bawah) pada waktu yang lebih besar.....	39
Gambar 4.10	Grafik frekuensi vs daya input .....	41
Gambar 4.11	Grafik frekuensi vs daya output .....	42
Gambar 4.12	Grafik daya output vs efisiensi .....	42
Gambar 4.13	Grafik frekuensi vs lama pemanasan.....	42
Gambar 4.14	Fitur power analyzer pada osiloskop .....	43
Gambar 4.15	Grafik VCr pada osiloskop (kuning) .....	44
Gambar 4.16	Topologi konverter <i>rectifier-dc link inverter</i> untuk aplikasi pemanas induksi tanpa ZCS .....	45
Gambar 4.17	Topologi konverter resonan AC-AC dengan ZCS untuk aplikasi pemanas induksi.....	45

Gambar 4.18 Bentuk gelombang arus (merah) dan tegangan (biru) pada <i>switch</i> dari topologi konverter gambar 4.13 .....	45
Gambar 4.19 Bentuk gelombang arus (merah) dan tegangan (biru) pada <i>switch</i> dari topologi konverter tugas akhir kali ini.....	46

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Tabel Req maksimal yang boleh digunakan untuk memenuhi daya maksimal 110 watt dengan tegangan input 100 V .....	19
Tabel 3.2	Hasil pengukuran beban pemanasan induksi dengan LCR meter .....	21
Tabel 3.3	Nilai QIH dari beban. ....	21
Tabel 3.4	Nilai kapasitor resonan ( $C_r$ ) jika menggunakan $f_{sw,max}$ 97 kHz .....	22
Tabel 3.5	Tegangan puncak output konverter .....	23
Tabel 3.6	Spesifikasi desain Konverter Resonan AC-AC dengan <i>ZCS (Zero Current Switching)</i> untuk Aplikasi Pemanasan Induksi .....	28
Tabel 3.7	Daya output hasil dari perhitungan dan dari simulasi dengan softwre PSIM.....	31
Tabel 3.8	<i>Voltage peak</i> ( $V_{Cr}$ ) dari output dari hasil perhitungan dan simulasi dengan PSIM .....	31
Tabel 4.1	Perbandingan hasil pengukuran pada sisi input dan output.....	41
Tabel 4.2	Tabel perubahan frekuensi terhadap lama pemanasan (mencapai suhu 55 derajat celcius).....	41
Tabel 4.3	Perbandingan nilai $V_{Cr}$ dari perhitungan, simulasi, dan implementasi.....	43
Tabel 4.4	Tabel hasil perhitungan dan simulasi dengan konverter <i>ZCS</i> dan non <i>ZCS</i> dengan input tegangan $V_{rms}$ 100 V dan frekuensi <i>switch</i> 75 kHz .....	46

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini penggunaan pemanas induksi sebagai salah satu metode pemanasan mulai diminati. Hal ini dikarenakan metode pemanasan induksi memiliki beberapa kelebihan diantaranya pemanasannya yang cepat, mudah dikontrol, cocok untuk industri, efisiensinya tinggi, serta aman dan bersih. Aplikasinya pun dapat ditemukan dalam berbagai bidang mulai pada bidang industri, medis, sampai aplikasi kompor listrik. Pada umumnya rangkaian pemanasan induksi menggunakan *rectifier* dan *dc-link inverter* untuk menghasilkan frekuensi tinggi dan daya output yang diinginkan. Topologi klasik menggunakan *rectifier* dan *dc-link inverter* sudah cukup baik dalam memenuhi fitur-fitur yang dibutuhkan pada pemanasan induksi, namun para engineer berusaha memperbaiki kelemahannya yaitu pada efisiensi dan banyaknya komponen yang digunakan. Saat ini banyak konverter dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan mereduksi komponen yang digunakan. Dari rangkaian *rectifier* dan *dc-link inverter* rata-rata dihasilkan efisiensi rata-rata 90 % dan komponen yang digunakan cukup banyak, sehingga untuk meningkatkan efisiensi dan memotong biaya saat ini mulai banyak dikembangkan topologi-topologi baru untuk aplikasi pemanasan induksi salah satunya dengan konverter AC-AC langsung. Diharapkan dengan konversi langsung dari AC ke AC seperti konverter ini ditambah yang dengan teknik *soft switching (ZCS)*, dapat dihasilkan konverter untuk aplikasi pemanasan induksi yang memiliki efisiensi tinggi, minim biaya, dan dapat digunakan untuk aplikasi kompor listrik.

### 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Merancang dan mengimplementasikan konverter langsung AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* yang dapat digunakan untuk aplikasi kompor listrik.
2. Merancang dan mengimplementasikan *control circuit* yang digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM untuk mengontrol switch IGBT.

3. Menentukan frekuensi *switch* IGBT, dan arus, tegangan, daya input, dan daya output dari konverter agar dapat digunakan untuk aplikasi sebuah kompor.
4. Merancang dan mengimplementasikan beban induktif yang dapat digunakan untuk menghasilkan arus eddy untuk memanaskan beban resistif (panci).

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak, seperti PSIM, Matlab, Proteus, dan software yang dibutuhkan lainnya.
2. Desain dan implementasi dari rangkaian konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)* yang memiliki frekuensi pensaklaran maksimal sebesar 97 kHz dan daya output maksimal sebesar 110 Watt, dan tegangan masukan maksimal sebesar 100 Volt AC. Konverter ini memiliki keluaran pada beban, yaitu berupa *coil* yang dibuat dari tembaga berisolasi dan pancinya.
3. Desain dan implementasi dari beban yang terbuat dari koil tembaga.
4. Desain dan implementasi rangkaian untuk membangkitkan sinyal PWM beserta *gate drive*-nya.
5. Komponen yang digunakan untuk pengimplementasian alat dari rangkaian konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)* sedikit berbeda antara desain dan simulasinya karena harus menyesuaikan dengan komponen yang ada dipasaran dan beberapa peralatan penunjang di laboratorium seperti power supply dan alat ukurnya.

### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui hal-hal yang berkaitan dengan pemanas induksi, elektronika daya, konverter AC-AC, resonan konverter, dan sinyal PWM.
2. Mendesain dan mengimplementasikan konverter resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk aplikasi pemanasan

induksi sehingga mendapatkan tegangan, arus, dan daya keluaran yang mampu digunakan untuk kompor induksi.

3. Membandingkan dan menganalisa hasil implementasi konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) dengan hasil desain dan simulasi pada perangkat lunak.

## **1.5 Metodologi**

Metodologi penelitian yang digunakan pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Dalam tahap ini dilakukan pengumpulan literatur atau referensi yang telah ada baik dari jurnal internasional, jurnal nasional, buku, maupun sumber lain yang berhubungan dengan tugas akhir yang akan dikerjakan. Setelah itu dilakukan studi literatur terhadap referensi yang telah ada.

2. Desain Simulasi

Dalam tahap ini dilakukan desain simulasi konverter. Simulasi ini diperlukan untuk pemodelan konverter tersebut. Melalui simulasi tersebut dapat dicek apakah konverter yang telah didesain sudah benar atau belum. Lalu dari simulasi ini dapat kita tentukan besaran atau komponen yang diperlukan untuk alat yang akan dibuat. Selain itu pada tahap ini akan dibuat desain dari beban dan kompor listrik yang akan direalisasikan.

3. Pengimplementasian Alat

Dalam tahap ini dilakukan pembuatan konverter berdasarkan pada simulasi yang telah dibuat. Pembelian komponen juga dilakukan pada tahap ini. Setelah itu dilakukan perangkaian komponen-komponen tersebut. Setelah alat ini jadi maka dilakukan pengujian atau pengukuran seperti tegangan, arus, dan efisiensi konverter. Dalam tahap ini pula akan dibuat beban dan implementasi dari kompor listrik.

4. Analisa Data

Setelah alat selesai dibuat dan telah bekerja sesuai dengan teori maka akan didapatkan data-data yang dibutuhkan, setelah itu data-data tersebut akan dibandingkan dengan simulasi yang telah dibuat. Setelah itu data-data tersebut dianalisa.

## 5. Kesimpulan

Memberikan kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan dari hasil implementasi alat dan analisa dari data yang telah didapatkan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan buku Tugas Akhir ini sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut :

### **BAB 1 : Pendahuluan**

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi dari penelitian yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini.

### **BAB 2 : Teori Penunjang**

Bab ini berisi tentang dasar teori mengenai konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)*, perhitungan untuk mencari besar nilai komponen penyusun, *pulse width modulation (PWM)*.

### **BAB 3 : Perancangan dan Implementasi Sistem**

Bab ini berisi tentang perancangan, simulasi dan implementasi dari rangkaian konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)*.

### **BAB 4 : Pengujian Sistem dan Analisis Data**

Bab ini berisi tentang pengujian sistem baik saat menjadi satu sistem maupun saat terpisah-pisah. Selain itu pada bab ini juga berisi tentang analisis data antara data hasil simulasi pada perangkat lunak dengan data hasil pengujian implementasi rangkaian konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)*.

### **BAB 5 : Penutup**

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari proses perancangan dan implementasi semua peralatan yang berkenaan dengan konverter resonan langsung AC-AC dengan *Zero Current Switching (ZCS)*. Selain itu, pada bab ini juga berisi tentang saran-saran untuk perancangan rangkaian konverter resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk aplikasi pemanasan induksi kedepannya, sehingga bisa didapatkan performa sistem yang lebih baik lagi.

## **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya apabila ingin mendesain rangkaian konverter AC-AC.
2. Dapat menjadi referensi bagi peneliti yang ingin membangkitkan sinyal PWM terutama pada switch yang digunakan pada aplikasi elektronika daya.
3. Dapat menjadi referensi bagi peneliti yang ingin membuat topologi rangkaian dan beban yang akan digunakan untuk pemanasan induksi
4. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk Tugas Akhir-nya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

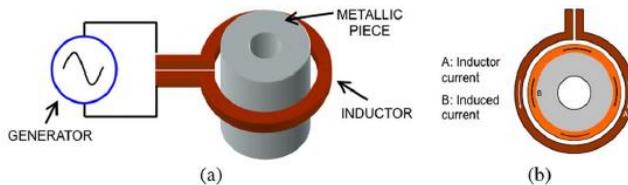
## BAB 2

### KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS (ZERO CURRENT SWITCHING) UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI DAN STRATEGI PENSAKLARAN

#### 2.1 Pemanasan Induksi

Pemanasan Induksi merupakan teknik pemanasan dengan cara induksi, sehingga dapat dilakukan tanpa menyentuh objek yang dipanaskan. Pemanasan induksi memanfaatkan induksi medan magnet untuk memanaskan objek yang dipanaskan. Panas pada objek dapat timbul karena adanya rugi-rugi arus eddy dan rugi-rugi hysteresis yang mengalir pada objek yang umumnya berbahan feromagnetik. Arus eddy tersebut arahnya melingkar dan berlawanan dengan medan magnet yang menembus objek.

Pemanasan induksi terjadi ketika terdapat koil (kumparan) yang umumnya berbahan tembaga berada di dekat objek pemanasan. Untuk beban atau objek yang dipanaskan akan lebih cepat panas jika menggunakan bahan feromagnetik dan memiliki resistansi lebih tinggi karena bahan yang lebih resistif akan lebih tahan terhadap arus dan menghasilkan panas lebih cepat.

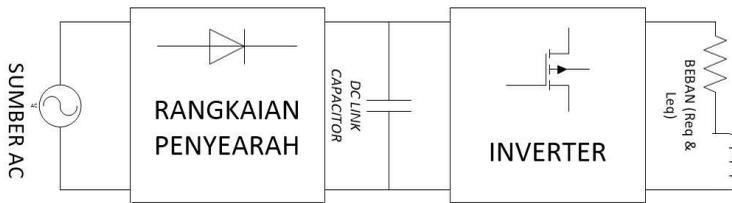


**Gambar 2.1** Ilustrasi bagaimana pemanas induksi bekerja : (a) tampak samping (b) tampak atas

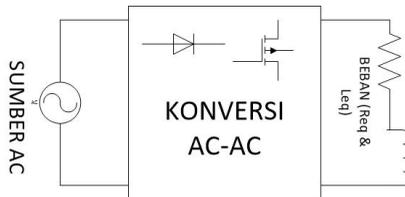
Prinsip kerjanya ialah ketika kumparan yang dialiri daya AC mengelilingi atau ada di sekitar logam, maka medan magnet akan dihasilkan oleh arus yang ada di kumparan dan kumparan tersebut akan memiliki *losses* (*hysteresis losses*) yang dapat menyebabkan panas. Pada saat yang sama, pada medan magnet yang berlawanan dengan arus AC dihasilkan arus eddy oleh induksi elektromagnetik. Arus eddy inilah yang menghasilkan pemanasan joule. Sehingga panas pada teknik pemanasan induksi disebabkan oleh dua faktor, yaitu rugi-rugi hysteresis, dan rugi-rugi arus eddy.

Teknik pemanasan induksi membutuhkan frekuensi tinggi pada outputnya, hal ini dikarenakan pada frekuensi yang lebih tinggi akan terjadi efek kulit pada kumparan yang berbahan tembaga sehingga arus akan cenderung mengalir di dekat permukaan penghantar dan artinya arus akan lebih dekat ke objek yang dipanaskan, sehingga pada frekuensi yang lebih tinggi objek akan lebih mudah panas dan induktansi beban akan semakin berkurang dan outputpun akan semakin stabil dari *inductive voltage spike*. Selain itu pada frekuensi yang lebih tinggi medan magnet yang dihasilkan akan memotong objek dengan lebih cepat sehingga pemanasan akan berlangsung lebih cepat.

Untuk membangkitkan frekuensi yang tinggi tersebut umumnya digunakan rangkaian gabungan antara *rectifier*, dan *dc-link* inverter. Pada inverter inilah akan dibangkitkan daya AC berfrekuensi tinggi. Daya berfrekuensi tinggi inilah yang akan disalurkan ke kumparan untuk memanaskan objek.



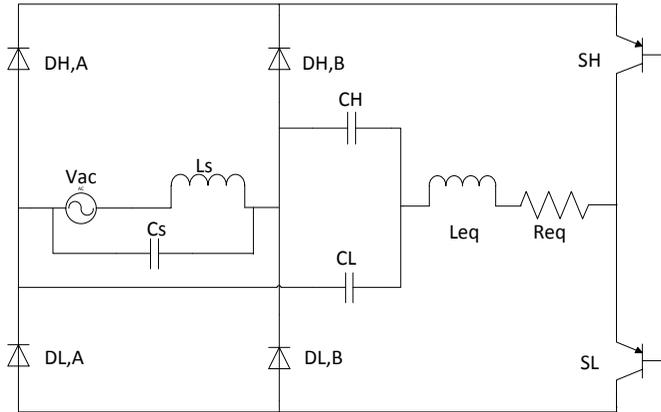
(a)



(b)

**Gambar 2.2** (a) Skema rangkaian pemanas induksi menggunakan *rectifier* dan inverter (b) Skema rangkaian pemanas induksi menggunakan konverter AC-AC langsung

## 2.2 Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi



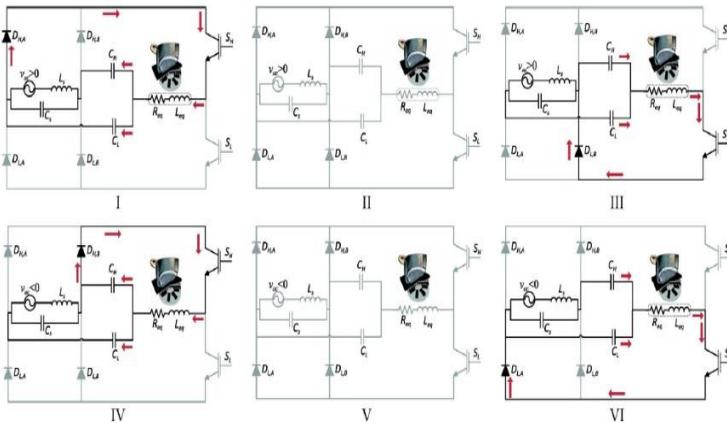
**Gambar 2.3** Topologi rangkaian konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi

Konverter langsung resonan AC-AC ini didesain khusus untuk mengurangi komponen yang dibutuhkan dibandingkan dengan rangkaian konservatif dari pemanasan induksi yang umum digunakan. Hal ini dikarenakan konversi daya AC terjadi satu tingkat saja, tidak seperti topologi konverter pemanas induksi pada umumnya yaitu menggunakan *rectifier* dan *dc-link* inverter yang menggunakan dua tingkat konversi. Selain itu konverter langsung resonan AC-AC ini juga berpotensi untuk mengurangi biaya pembuatan, meningkatkan efisiensi dan menambah keandalan. Pada konverter ini terdapat *rectifier* dan inverter sekaligus, sehingga dapat mereduksi komponen yang digunakan. *Soft switching* pada konverter ini dapat dicapai saat transisi *turn on* dan *turn off*, sehingga dapat meningkatkan efisiensi konverter. Selain itu daya pada konverter ini juga linier terhadap frekuensi, tegangan input, juga beban dari konverter.

Konverter ini dirancang memiliki *rectifier* dan inverter dalam satu tingkat saja, sehingga mengurangi jumlah komponen yang dibutuhkan jika dibandingkan dengan rangkaian pemanas induksi pada umumnya. Selain itu konverter ini juga mengoptimalkan *switching* pada kondisi transisi *turn on* dan *turn off*. Input tegangan AC pada konverter

ini difilter dengan induktor bernilai kecil ( $L_s$ ) dan kapasitor ( $C_s$ ) untuk memastikan faktor dayanya mendekati satu dan mengurangi konten harmonik. Kemudian empat dioda *switching* cepat  $D_{H,A}$   $D_{L,A}$   $D_{H,B}$   $D_{L,B}$  digunakan untuk menyearahkan arus dan tegangan yang kemudian akan masuk ke dua switch SH dan SL yang saling bergantian kerjanya. Dari switch tersebut tegangan dari beban (*inductor-pot system*) disuplai. Pada konverter ini resonan kapasitor  $C_r$  yang terdiri dari  $C_H$  dan  $C_L$  langsung terhubung ke suplai input, sehingga arus dari beban tidak bisa kembali lagi ke komponen *switching* dan memastikan aliran arus menjadi searah dan mengurangi *losses*. Lebih jauh lagi, *zero current switching* akan dicapai selama transisi *turn on* dan *turn off*, konduksi dioda akan berkurang, dan menambah efisiensi konverter.

Konverter ini akan bekerja pada enam mode yang berbeda seperti pada gambar. Mode I-III terjadi ketika gelombang AC positif menyuplai input, sedangkan mode IV-VI terjadi ketika gelombang AC negatif menyuplai input. Pada II dan V terdapat *deadtime*, yaitu waktu saat kedua switch tidak ada yang bekerja, karena ketika kedua switch bekerja secara bersamaan, konverter ini tidak akan bekerja dengan semestinya.



**Gambar 2.4** Mode kerja konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi

Output dari konverter ini dapat diatur dengan mengubah-ubah frekuensi switch ( $f_{sw}$ ). Pada rangkaian resonan konverter diatas

persamaan arus output terhadap waktu dapat dicari dengan persamaan dibawah ini :

$$io(t)Req + Leq \frac{dio(t)}{dt} + \frac{1}{Cr} \int_0^t io(\tau) dt = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dari persamaan diatas dapat diturunkan persamaan  $io(t)$ , sehingga

$$io(t) = \frac{VCr}{Leq\omega n} e^{\varepsilon} \sin(\omega nt) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana,

- $io(t)$  = Arus output pada beban pada waktu t
- $VCr$  = Tegangan kapasitor resonan ( $C_H + C_L$ )
- $Leq$  = Nilai ekuivalen induktansi beban
- $\omega n$  =  $\sqrt{\omega\sigma^2 - \xi^2}$
- $\omega\sigma$  =  $1/\sqrt{LeqCr}$
- $\xi$  =  $Req/2Leq$

Kemudian daya output dari konverter ini dapat dicari dengan mengintegalkan daya output rata-rata pada periode switching tertentu

$$po(Tsw) = Vac((1/Tsw) \int_0^{(\frac{\pi}{\omega n})} io(t) dt \dots\dots\dots (2.3)$$

Kemudian setelah persamaan tersebut diturunkan, didapatkan persamaan output daya dengan suplai Vac,rms.

$$Po = fsw \frac{Vac,rms^2}{Leq\omega\sigma^2} \coth\left(\frac{\pi\xi}{2\omega n}\right) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana,

- $Tsw$  = periode switching
- $fsw$  = frekuensi switching

Kesimpulannya adalah daya output linier dengan frekuensi *switching*. Dimana frekuensi *switching* maksimal adalah  $fsw,max = \omega n/2\pi$ , Sehingga, semakin tinggi frekuensi *switching*, semakin tinggi pula daya outputnya.

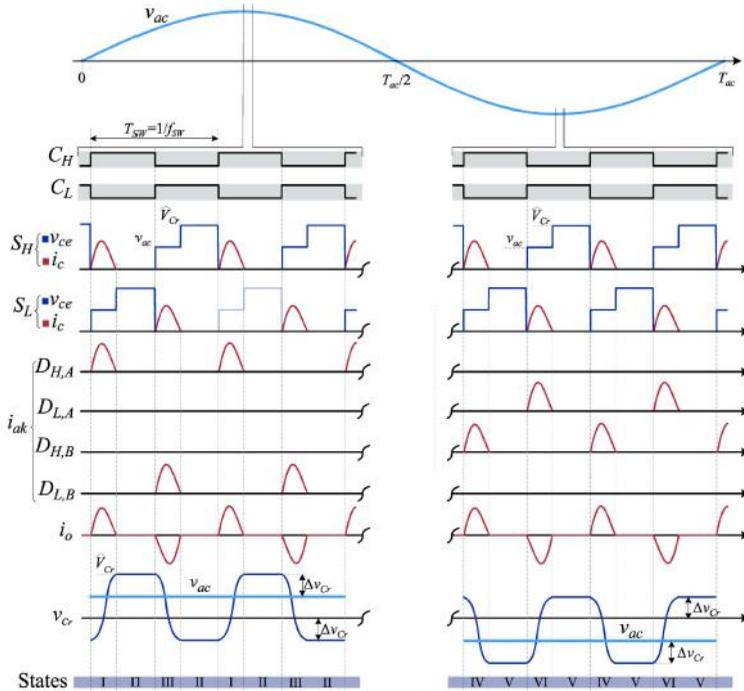
Selain itu tegangan puncak dari kapasitor resonan yang juga merupakan tegangan puncak dari konverter ini dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$VCr = \frac{Vac}{1 - e^{-\xi\frac{\pi}{\omega n}}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana,

- $VCr$  = tegangan puncak kapasitor
- $Vac$  = tegangan puncak input

Berikut ini merupakan fungsi gelombang *switching* utama konverter terhadap tegangan suplai.



**Gambar 2.5** Bentuk gelombang *switching* utama konverter terhadap tegangan suplai

### 2.3 Analisa Efisiensi

Analisa efisiensi merupakan hal yang perlu diperhatikan dan diamati agar dapat mengoptimalkan efisiensi kerja dari konverter. Berikut ini adalah analisa efisiensi dari konverter ini.

#### 2.3.1 Rugi-Rugi Konduksi

Merupakan rugi-rugi yang disebabkan oleh arus saat melewati komponen terutama saat dioda dan IGBT dalam kondisi ON.

$$P_{on, IGBT} = P_o \left( \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{v_{on}}{v_{ac,rms}} + \frac{r_{on}}{Req} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

$$P_{on, diode} = P_o \left( \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{v_{ak}}{v_{ac,rms}} + \frac{r_{ak}}{Req} \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana,

- $v_{on}$  = tegangan saat IGBT ON
- $r_{on}$  = resistansi IGBT saat ON
- $v_{ak}$  = tegangan dioda saat dilewati arus
- $r_{ak}$  = resistansi dioda saat dilewati arus

### 2.3.2 Rugi-Rugi Switching

Meskipun konverter ini dioperasikan dengan *ZCS (Zero Current Switching)*, namun rugi-rugi *switching* masih terdapat pada konverter ini, terutama berkaitan dengan rugi-rugi *switching* saat switch IGBT transisi ke ON, rugi-rugi oleh kapasitansi output dari IGBT, dan juga rugi-rugi dioda saat *reverse*. Rugi-rugi saat transisi *switching* IGBT ke ON dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$E_{sw, a}(T_{sw}) = VC r \int_0^{t_{f,v}} \left( \frac{t_{f,v} - t_f}{t_{f,v}} \right) i_o(t) dt \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana,

- $t_{f,v}$  = *voltage fall time*

Sedangkan rugi-rugi akibat kapasitansi output dari IGBT dan rugi-rugi dioda saat *reverse* dapat dihitung dengan persamaan (8) dan (9)

$$E_{sw, b} = \frac{C_{oss} V_{ac,rms}^2}{(1 - e^{(-\xi \frac{\pi}{\omega n})})^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$E_{sw, c} = V_{ac,rms} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left( \frac{-e^{(-\xi \frac{\pi}{\omega n})}}{1 - e^{(-\xi \frac{\pi}{\omega n})}} \right) Q_{rr} \dots\dots\dots (2.10)$$

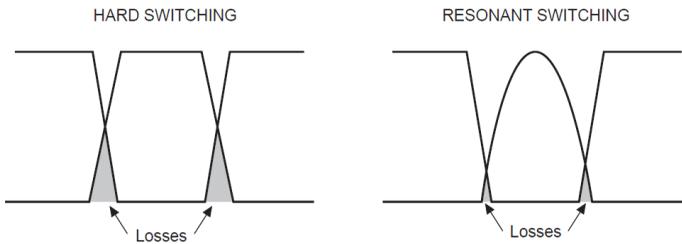
Dimana,

- $C_{oss}$  = rugi-rugi akibat kapasitansi output
- $Q_{rr}$  = muatan *reverse recovery* dari dioda

### 2.4 Resonant Converter (Zero Current Switching)

*Resonant switch* pada konverter resonan ditujukan untuk mengurangi rugi-rugi saat pensaklaran. Resonansi *switch*, menggunakan resonansi dari kapasitansi sirkuit dan induktansi sirkuit untuk membentuk gelombang dari arus atau tegangan yang melintasi elemen

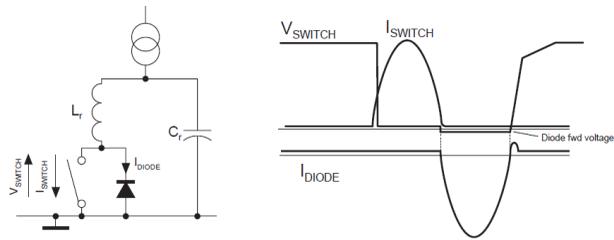
*switching*. Sehingga bila *switching* berlangsung, tidak ada arus atau tegangan yang melalui sistem tersebut, dan karenanya tidak ada disipasi daya. Sebuah rangkaian yang menggunakan teknik ini dikenal sebagai konverter resonan (atau sebuah konverter kuasi-resonan, karena hanya bagian dari sinusoidal resonan yang digunakan). *Zero Current Switching (ZCS)* sirkuit membentuk gelombang arus, sementara *Zero Voltage Switching (ZVS)* sirkuit membentuk gelombang tegangan.



**Gambar 2.6** Gelombang arus dan tegangan saat *hard switching* dan *resonant switching*

#### 2.4.1 *Zero Current Switching (ZCS)*

ZERO Current Switching terdiri dari switch S, disusun secara seri dengan induktor resonan  $L_{res}$ , dan  $C_{res}$  kapasitor resonan terhubung secara paralel. Energi disuplai oleh sumber arus. Rangkaian dan bentuk gelombang yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Jika transformator output digunakan, dalam kasus-kasus tertentu induktansi bersifat merugikan namun dapat digunakan sebagai induktansi resonan. Frekuensi resonansi umumnya tidak diketahui nilainya dan tidak tetap, yang dapat menyebabkan masalah dalam desain sirkuit. Ketika saklar S dimatikan, kapasitor resonan dibebankan dengan lebih atau kurang dari arus konstan, sehingga tegangan di atasnya meningkat secara linier. Ketika saklar dihidupkan, energi yang tersimpan dalam kapasitor ditransfer ke induktor, menyebabkan arus sinusoidal mengalir di *switch*. Selama setengah gelombang negatif, arus mengalir melalui dioda anti-paralel, dan dalam periode ini tidak ada arus atau tegangan yang melalui pada saklar, dan saklar dapat dimatikan tanpa kerugian. Jenis *switching* juga dikenal sebagai modus thyristor, perangkat ini hanya akan mati jika arus yang melalui mereka dipaksa untuk nol, yang terjadi secara alami dalam topologi ini.



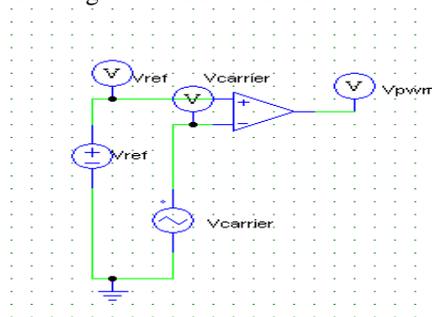
**Gambar 2.7** Topologi dan gelombang dari *Zero Current Switching (ZCS)*

## 2.5 *Pulse Width Modulation (PWM)*

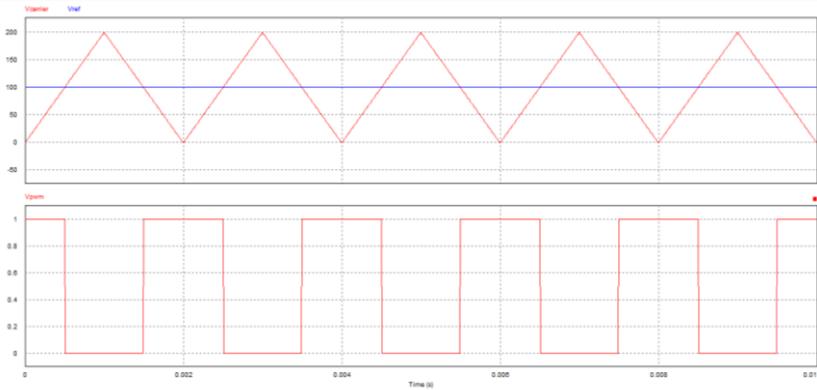
*Pulse width modulation (PWM)* adalah gelombang pulsa atau gelombang kotak yang dapat dibangkitkan dengan tiga komponen yaitu sinyal carrier, sinyal referensi dan komparator. Umumnya, PWM menggunakan sinyal carrier berupa sinyal segitiga. Sinyal referensi berupa tegangan DC. Sedangkan komparator sebagai pembanding dari sinyal segitiga tersebut dengan tegangan DC.

Pengaturan lebar pulsa dari PWM dapat dilakukan dengan cara mengubah tegangan referensinya atau tegangan DC. Ketika sinyal referensi bernilai lebih tinggi daripada sinyal carriernya komparator akan mengeluarkan sinyal *ON*, begitu pula sebaliknya. Sedangkan *Duty Cycle* merupakan lamanya interval *ON* dari sinyal kotak terhadap periodenya.

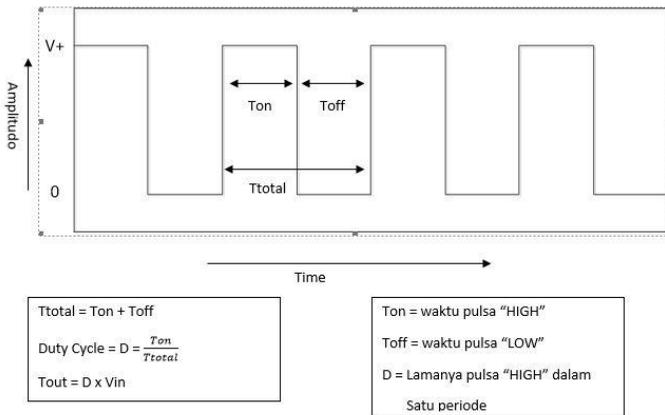
PWM (*Pulse Width Modulation*) pada tugas akhir ini akan digunakan untuk mengatur frekuensi switching pada switch yang digunakan oleh konverter. Rencananya sinyal PWM pada tugas akhir ini akan dibangkitkan menggunakan mikrokontroler.



**Gambar 2.8** Rangkaian Penghasil PWM



**Gambar 2.9** Cara Kerja PWM



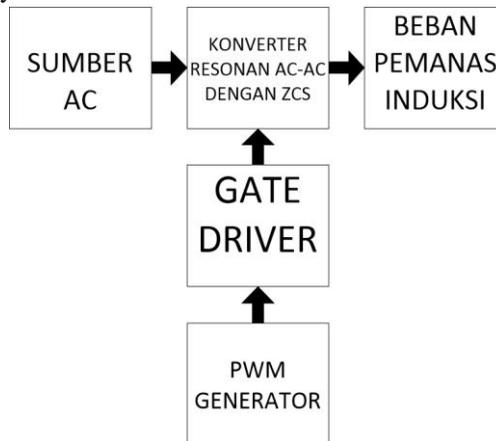
**Gambar 2.10** Persamaan-persamaan PWM

### BAB 3

## PERANCANGAN KONVERTER RESONAN AC-AC DENGAN ZCS (*ZERO CURRENT SWITCHING*) UNTUK APLIKASI PEMANASAN INDUKSI

### 3.1 Blok Diagram Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

Gambar 3.1 menunjukkan blok diagram keseluruhan dari konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi. Pada blok diagram tersebut dapat dilihat bahwasannya konverter ini akan menggunakan suplai tegangan AC yang bisa didapatkan dari catu daya AC yang direncanakan hingga sebesar 100 V. Konverter ini juga akan menggunakan IGBT sebagai saklar untuk meningkatkan frekuensi tegangan outputnya yang akan menyuplai beban pemanas induksi yang terdiri dari rangkaian induktor dan objek pemanasannya.



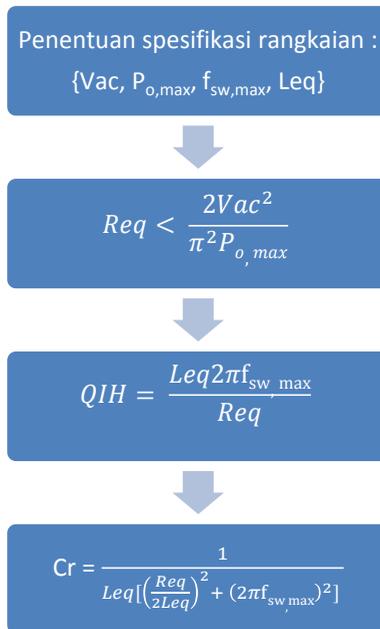
**Gambar 3.1** Blok diagram rangkaian konverter Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

Terminal *gate* pada saklar IGBT tersebut akan di *trigger* dengan menggunakan sinyal PWM yang akan dikuatkan tegangan outputnya

dengan rangkaian *gate driver*. Sinyal PWM sendiri akan dibangkitkan dengan menggunakan mikrokontroler dan rangkaian *gate driver*nya akan menggunakan IC TLP 250. Kemudian tegangan dari switch akan masuk pada beban pemanas induksi yang dimodelkan dari kawat tembaga yang dipilin ditambah dengan ferit beserta dengan objek yang dipanaskan.

### 3.2 Perancangan Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

Kita dapat menentukan spesifikasi yang kita inginkan dari konverter ini melalui *flowchart* pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** *Flowchart* perancangan rangkaian konverter resonan AC AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi

Dari persamaan pada *flowchart* tersebut dapat ditentukan terlebih dahulu daya output maksimal,  $V_{input}$  maksimal,  $f_{sw,max}$ , dan  $Leq$ . Selain itu, dari persamaan pada *flowchart* tersebut juga dapat dilakukan koreksi

apakah Req dari beban memenuhinya. Untuk perancangan konverter pada tugas akhir ini dilakukan pembatasan daya output, yaitu maksimal daya output dari konverter adalah sekitar 110 watt, sedangkan daya input yang digunakan hingga 100 Vac,rms yang bersumber dari catu daya AC. Pembatasan nilai daya output dan tegangan input yang kecil ini bertujuan untuk memudahkan dalam menyediakan komponen yang dibutuhkan. Sedangkan  $f_{sw,max}$  dan QIH dapat disesuaikan dengan beban. Dari persamaan pada flowchart dapat dilakukan perhitungan, nilai Req maksimal yang boleh digunakan seperti pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Tabel Req maksimal yang boleh digunakan untuk memenuhi daya maksimal 110 watt dengan tegangan input 100 V

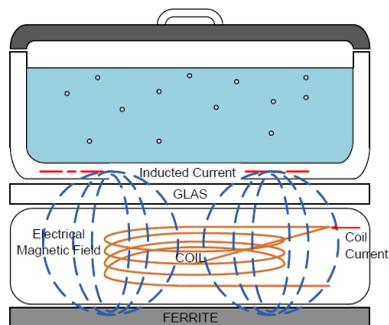
$P_{o,max}$ (watt)	Vac (V)	Req Maksimal ( $\Omega$ ), $Req < \frac{2Vac^2}{\pi^2 Po,max}$
110	100	22,31

### 3.3 Perancangan Beban Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (Zero Current Switching) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

Untuk membuat rangkaian pemanas induksi perancangan beban merupakan hal yang sangat fundamental dan harus dilakukan terlebih dahulu dikarenakan komponen-komponen pada rangkaian pemanas induksi yang akan digunakan bergantung pada nilai ekivalen dari beban pemanas induksi tersebut baik dari segi nilainya maupun ratingnya.

Beban pada pemanas induksi memiliki karakteristik utama yaitu bersifat induktif, karena nantinya dari beban tersebut akan menginduksikan rugi-rugi arus eddy dan rugi-rugi hysteresisnya pada objek yang akan dipanaskan. Selain itu beban pada pemanas induksi juga harus dapat menghantarkan arus dengan baik, karena nantinya arus yang besar akan mengalir pada beban tersebut disebabkan karakteristik rangkaian inverter pada umumnya dan untuk mempercepat pemanasan. Dari karakteristik yang dibutuhkan diatas maka pada umumnya beban pada pemanas induksi menggunakan kawat tembaga berisolasi sebagai bebannya. Pada umumnya, terutama pada beban pemanas induksi yang

akan digunakan sebagai kompor induksi akan ditambah dengan ferit untuk menambah nilai induktansinya serta diberi tambahan bahan yang dapat digunakan untuk meletakkan tembaga dan pembatas antara tembaga dan objek yang akan dipanaskan. Selain itu objek yang akan dipanaskan juga akan ditambahkan pada perhitungan nilai ekivalen beban.



**Gambar 3.3** Ilustrasi rancangan beban pada kompor induksi

Pada tugas akhir kali ini beban akan diimplementasikan menggunakan kawat tembaga dan objek yang dipanaskan yaitu sebuah panci berbahan *stainless steel*.

Untuk teknis pembuatannya digunakan jurnal ilmiah sebagai acuan, yaitu dengan cara 20 kawat tembaga berisolasi berdiameter 0,5 mm sepanjang 10 m akan dipilin kemudian diletakkan dengan diputar melingkar dan direkatkan pada akrilik. Pada sisi sebaliknya dari akrilik tersebut juga direkatkan ferit untuk menambah induktansi beban, kemudian pada bagian lilitan yang bersentuhan dengan objek, ditempelkan isolasi tahan panas agar objek yang nantinya panas tidak bersentuhan langsung dengan kawat tembaga berpilin.

Kemudian beban yang berupa gabungan kawat tembaga dan panci sebagai objek pemanasan tersebut diukur dengan menggunakan LCR meter untuk mengetahui nilai induktansi dan resistansinya. Dari pengukuran tersebut didapatkan hasil pada tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Hasil pengukuran beban pemanasan induksi dengan LCR meter

Frekuensi LCR (kHz)	Induktansi Beban, $Leq$ ( $\mu\text{H}$ )	Resistansi beban, $Req$ ( $\Omega$ )	Faktor kualitas induktor (QIH) pada frekuensi uji LCR meter
10	59,23	2,15	1,729
100	27,51	7,942	2,17

Nantinya nilai  $Leq$  dan  $Req$  dari beban ketika diuji dengan frekuensi 100 kHz akan lebih dijadikan acuan karena nantinya beban akan dioperasikan pada frekuensi yang tinggi. Namun diperlukan pertimbangan lain dalam menentukan nilai  $Leq$  dan  $Req$  dari beban, dikarenakan pembacaan pada LCR meter terutama pada pembacaan  $Req$  masih belum begitu akurat. Oleh karena itu, diambil dari beberapa referensi bahwa untuk beban panci *stainless steel* berkualitas baik akan memiliki nilai  $Req$  antara 15  $\Omega$  sampai 20  $\Omega$ . Sehingga kita ambil pertengahannya yang tidak melebihi batas pada perhitungan  $Req$  maksimal yaitu 17,5  $\Omega$ . Jadi, pada konverter pemanas induksi kali ini ditetapkan nilai  $Req$  dan  $Leq$  dari beban adalah 17.5  $\Omega$  dan 28  $\mu\text{H}$  (nilai  $Leq$  dari pembulatan 27,51  $\mu\text{H}$ ).

Untuk frekuensi maksimal kita pilih 97 kHz, pemilihan ini dikarenakan IGBT pada umumnya dioperasikan pada frekuensi sekitar 20 kHz, namun pada sebuah referensi, IGBT dapat dioperasikan hingga mendekati 100 kHz. Karena ada perubahan nilai frekuensi maksimal dari frekuensi ukur pada LCR meter yaitu 100 kHz, maka nilai QIH dari induktor akan berbeda pula, nilai QIH dapat dihitung berdasarkan rumus pada flowchart, dengan  $Req$  dan  $Leq$  yang telah ditentukan yaitu 17.5  $\Omega$  dan 28  $\mu\text{H}$ .

**Tabel 3.3** Nilai QIH dari beban

$f_{sw, \max}$ (kHz)	$QIH = \frac{Leq 2\pi f_{sw, \max}}{Req}$
97	0.83



**Gambar 3.4** Foto dari beban yang diimplementasikan

### 3.4 Penentuan Komponen Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

Setelah mengetahui nilai ekivalen dari beban, maka kita dapat mulai menentukan nilai-nilai dan rating-rating dari komponen yang akan kita gunakan.

#### 3.4.1 Penentuan Kapasitor Resonan (Cr)

Kapasitor resonan (Cr) dapat ditentukan nilainya menggunakan persamaan yang ada dalam *flowchart*.

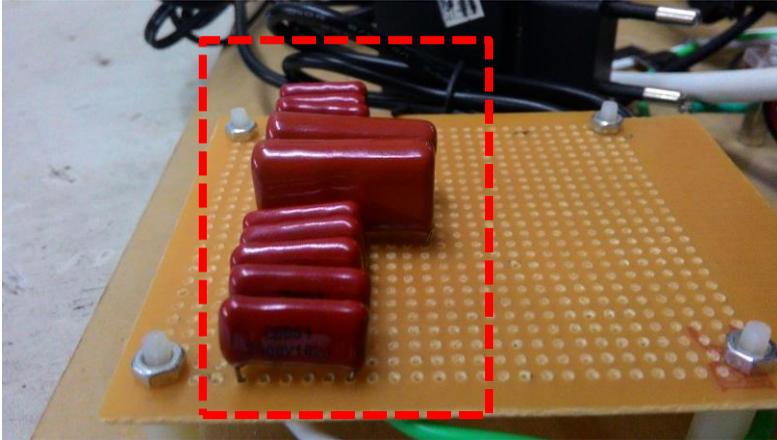
**Tabel 3.4** Nilai kapasitor resonan (Cr) jika menggunakan  $f_{sw,max}$  97 kHz

$f_{sw,max}$ (kHz)	$C_r = \frac{1}{L_{eq}[\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 + (2\pi f_{sw,max})^2]} \text{ (F)}$
97	$7.6084e-008 \text{ F} \approx 76 \text{ nF}$

Kapasitor yang akan digunakan pada konverter ini adalah kapasitor tegangan tinggi, seperti pada gambar 3.5. Karena kapasitor Cr ini juga harus bisa mengatasi tegangan puncak (VCr) dari Voutput sesuai persamaan pada bab 2. Sehingga untuk kapasitor dipilih kapasitor mylar dengan rating 2 kV AC.

**Tabel 3.5** Tegangan puncak output konverter

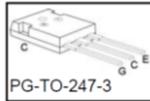
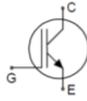
$V_{input,rms}, V_{ac} (V)$	$VCr = \frac{V_{ac}}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega n}}}$
100	176,7441



**Gambar 3.5** Jenis kapasitor mylar tegangan tinggi yang digunakan pada konverter

### 3.4.2 Penentuan IGBT

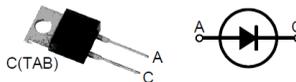
*Switch* pada konverter ini membutuhkan rating tegangan dan arus yang tinggi, sehingga dipilih *switch* jenis IGBT karena umumnya IGBT memiliki rating tegangan dan arus yang lebih tinggi daripada MOSFET disebabkan oleh karakteristiknya. Untuk frekuensi umumnya IGBT dioperasikan pada frekuensi tak lebih dari 20 kHz. Namun tidak masalah apabila kita mengoperasikan IGBT pada frekuensi hingga 100 kHz sesuai yang ada pada jurnal-jurnal ilmiah. Pada tugas akhir kali ini IGBT yang akan digunakan adalah IGW60T120 yang memiliki rating tegangan 1200 V, dan arus 60 A, yang perlu diperhatikan ialah untuk penentuan rating IGBT, dioda, dan kapasitor resonan harus memenuhi syarat yaitu diatas rating tegangan puncak kapasitor resonan ( $VCr$ ), yang persamaannya terdapat pada bab 2 dan nilainya terdapat pada tabel 3.5.



**Gambar 3.6** IGBT IGW60T120

### 3.4.3 Penentuan Dioda

Dioda pada konverter ini akan digunakan untuk menyearahkan arus yang akan memasuki switch IGBT. Sehingga dibutuhkan dioda berrating tinggi pula, idealnya dibutuhkan dioda yang memiliki rating hampir sama dengan IGBT yaitu 1200 V dan 60 A, hal ini disebabkan karena  $V_{peak}$  antara IGBT dan dioda adalah sama hanya arus pada dioda lebih kecil. Namun dipasaran agak sulit ditemui dioda yang memiliki rating seperti diatas, oleh karena itu sebagai alternatif digunakan dioda dengan recovery time yang cepat yaitu MUR 1560 dengan rating tegangan 600 V dan arus 20 A.



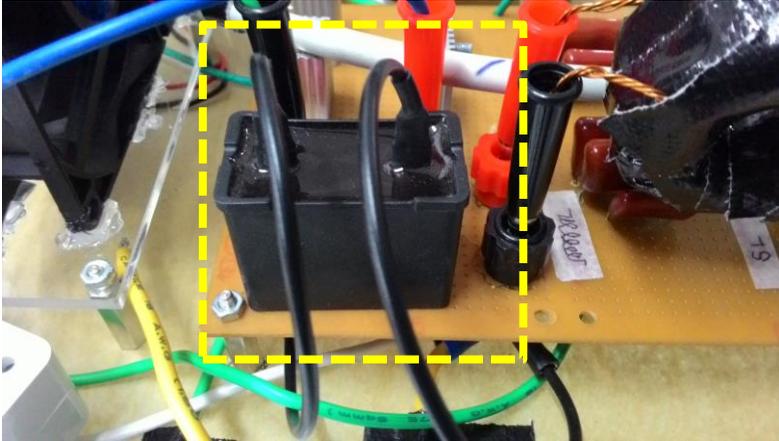
A=Anode, C=Cathode, TAB=Cathode

**Gambar 3.7** Dioda MUR 1560

### 3.4.4 Penentuan Filter Input (Cs dan Ls)

Topologi konverter yang digunakan pada tugas akhir kali ini menggunakan topologi konverter dengan konversi langsung, dimana salah satu ciri khas dari konverter ini adalah terdapat filter Cs dan Ls berupa kapasitor dan induktor pada inputnya. Filter pada input ini memiliki fungsi untuk memperbaiki sedikit faktor daya dan mengurangi harmonisa. Untuk penentuan filter pada tugas akhir kali ini digunakan filter dengan nilai kecil yang hampir sama dengan yang tertera pada

referensi dan mengacu pada jurnal ilmiah, yaitu  $C_s$  4  $\mu\text{F}$  dan  $L_s$  74  $\mu\text{H}$ . Untuk filter  $C_s$  digunakan kapasitor dengan rating tegangan 400 V, sedangkan induktor digunakan ferit yang biasa digunakan untuk membuat toroida yang dililit dengan tembaga hingga memiliki nilai seperti yang diinginkan berdasarkan teori induktor yang digunakan.



(a)



(b)

**Gambar 3.8** (a) Filter  $C_s$  yang digunakan merupakan jenis kapasitor teflon (b) Ilustrasi filter  $L_s$  yang akan digunakan merupakan induktor toroida

### 3.5 Perancangan *Pulse Width Modulation* (PWM)

*Pulse Width Modulation* (PWM) pada tugas akhir ini akan digunakan untuk mensaklar IGBT. PWM akan dibangkitkan dengan mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang pada mikrokontroler tersebut terdapat IC Atmega 2560.

Output PWM dari Arduino ini akan ditempatkan pada pin 11 dan pin 12, dimana pada Arduino Mega 2560 kedua pin tersebut dapat menghasilkan sinyal PWM. Kemudian mode yang digunakan untuk menghasilkan PWM adalah *phase correct* PWM.

PWM pada tugas akhir kali ini menggunakan timer 1 dengan kanal A dan B, yaitu TCCR1A dan TCCR1B untuk menghasilkan PWM, dimana kanal A dan B terdapat pada pin 11 dan pin 12 pada Arduino Mega 2560. Kemudian PWM pada kanal A dan B dibuat saling berlawanan (*inverting*). Kemudian digunakan rumus persamaan untuk menghasilkan frekuensi yang diinginkan, dan diatur *duty cycle* kedua output tersebut ditambah dengan *deadtime* pada pwm yang *diinvert*.



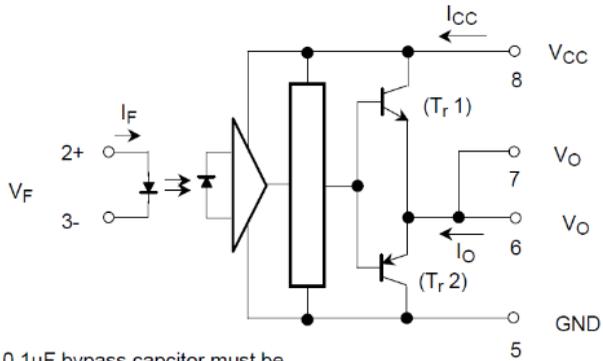
**Gambar 3.9** Arduino Mega 2560

### **3.6 Perancangan *Gate Driver* PWM**

Gate driver pada tugas akhir ini menggunakan isolated gate driver yaitu Optocoupler TLP 250, sehingga ground pada input TLP 250 terpisah dengan ground pada output yang tergabung dengan ground

rangkaian. Adapun skematik *gate driver* yang digunakan seperti pada gambar 3.10.

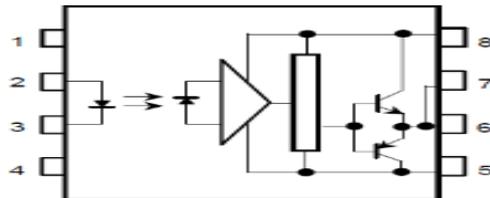
### Schematic



A 0.1 $\mu$ F bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

(a)

### Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 :  $V_O$  (Output)
- 7 :  $V_O$
- 8 :  $V_{CC}$

(b)

**Gambar 3.10** (a) Skematik TLP 250 (b) Konfigurasi pin TLP 250

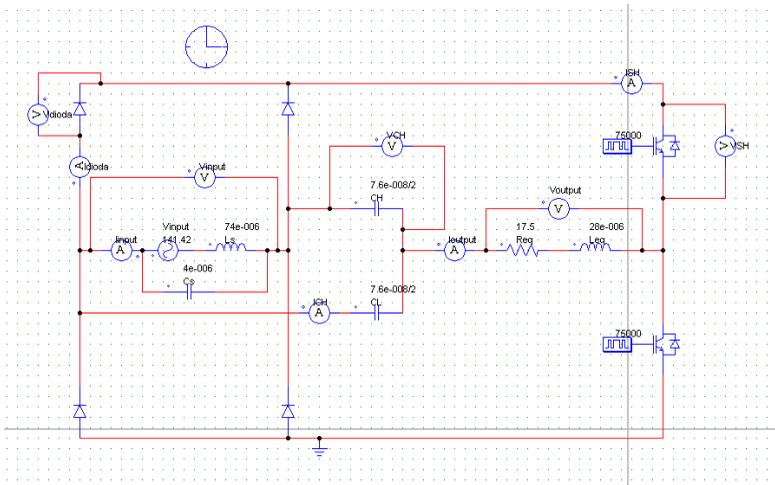
### 3.7 Kesimpulan Desain dan Spesifikasi Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

**Tabel 3.6** Spesifikasi desain Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

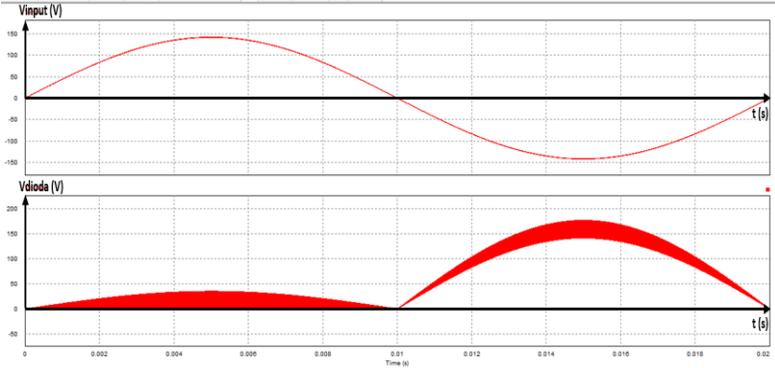
Spesifikasi Komponen	Nilai
Suplai tegangan (maksimal)	100 Vac,rms/50 Hz
Daya output (maksimal)	110 watt
Frekuensi switch	25 kHz – 97 kHz
Resistansi beban ( $R_{eq}$ )	17,5 $\Omega$
Induktansi beban ( $L_{eq}$ )	28 $\mu$ H
Kapasitor resonan ( $C_r$ )	76 nF
Filter input kapasitor ( $C_s$ )	4 $\mu$ H
Filter input induktor ( $L_s$ )	74 $\mu$ H
Pensaklaran (IGBT)	IGW60T120
Penyearah (dioda)	MUR 1560

### 3.8 Simulasi dan Perhitungan Manual Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

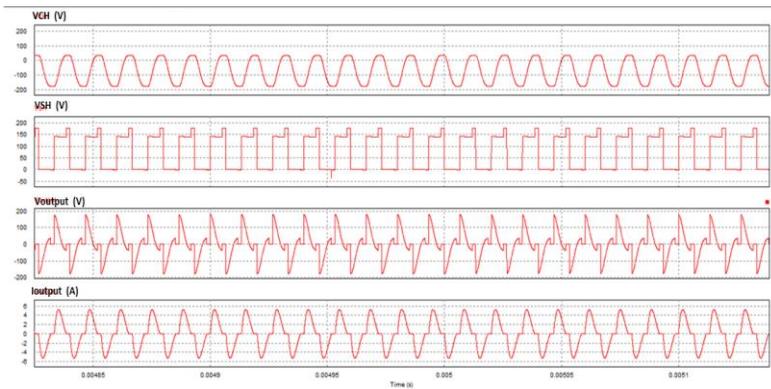
Perancangan konverter melalui simulasi dengan software PSIM perlu dilakukan sebagai pertimbangan, mengingat software PSIM dapat mensimulasikan sebuah rangkaian elektronika daya mendekati kondisi kenyataannya. Selanjutnya hasil simulasi dengan PSIM ini dapat dijadikan perbandingan dengan hasil *realnya*. Selain itu hasil perhitungan manual terhadap persamaan-persamaan konverter ini juga dapat dijadikan perbandingan.



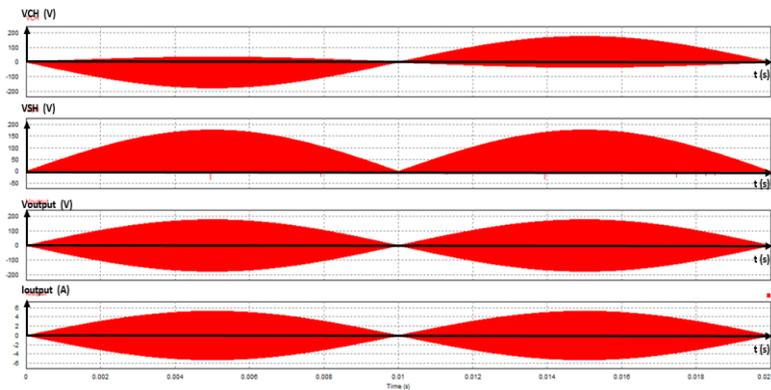
**Gambar 3.11** Rangkaian simulasi dengan PSIM Konverter Resonansi AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi



**Gambar 3.12** Bentuk tegangan input dan tegangan dioda hasil simulasi PSIM



**Gambar 3.13** Bentuk tegangan kapasitor resonan, tegangan IGBT, tegangan output, dan arus output hasil simulasi PSIM



**Gambar 3.14** Tegangan kapasitor, IGBT, tegangan output, dan arus output pada skala yang lebih besar

Simulasi pada PSIM dilakukan dengan memberikan tegangan input sebesar 100 Vac,rms.

**Tabel 3.7** Daya output hasil dari perhitungan dan dari simulasi dengan softwre PSIM

Frekuensi switch (kHz)	Daya output dari perhitungan (watt)	Daya output dari simulasi PSIM (watt)
25	28.5226	28,77
50	57.0452	56,91
75	85.5678	85,42
97	110.6677	110,53

**Tabel 3.8** *Voltage peak* (VCr) dari output dari hasil perhitungan dan simulasi dengan PSIM

VCr dengan perhitungan (V)	VCr dengan PSIM (V)
176,7441	176,8

Dari tabel perbandingan hasil perhitungan dan simulasi tidak terdapat perbedaan yang terlalu signifikan.

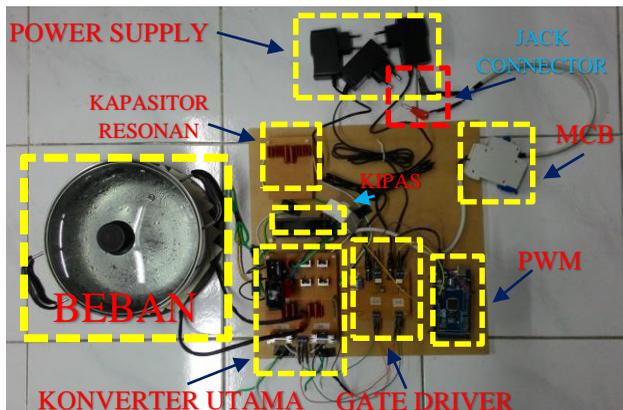
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL UJICoba DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil ujicoba dan analisis data dari pengimplementasian rangkaian konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi. Hasil yang didapatkan nantinya akan dibandingkan dengan hasil simulasi dan hasil perhitungan yang telah dibahas pada bab sebelumnya, untuk membandingkan kinerja dari konverter ini dengan teorinya. Gambar 4.1 merupakan hasil implementasi dari rangkaian konverter ini.

Gambar 4.1 terdiri dari *power supply* DC, pembangkit sinyal PWM, *driver* IGBT, konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*), MCB, pendingin kipas, dan beban dari kompor induksi, serta kabel untuk menghubungkan rangkaian ke catu daya AC. *Power supply* berfungsi untuk mensuplai PWM dan *driver* IGBT. Terdapat tiga *power supply* yang memiliki tegangan masukan sebesar 220 Volt AC dan satu power suplai memiliki tegangan keluaran sebesar 9 Volt DC untuk menyuplai Arduino Mega 2560 dan dua buah power suplai memiliki tegangan keluaran 12 Volt DC masing-masing untuk menyuplai dua buah gate driver dan salah satu catu daya menyuplai satu kipas.



**Gambar 4.1** Implementasi dari rangkaian konverter resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk aplikasi pemanasan induksi

Pembahasan pada bab ini diawali tentang analisa hasil pengujian dan pengambilan data berupa gelombang-gelombang tegangan dan arus yang melalui komponen pada konverter ini. Selanjutnya diambil data-data yang dibutuhkan untuk melakukan analisa terhadap hasil kerja dari konverter ini.

#### **4.1 Pengambilan Data Grafis Hasil Uji Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi**

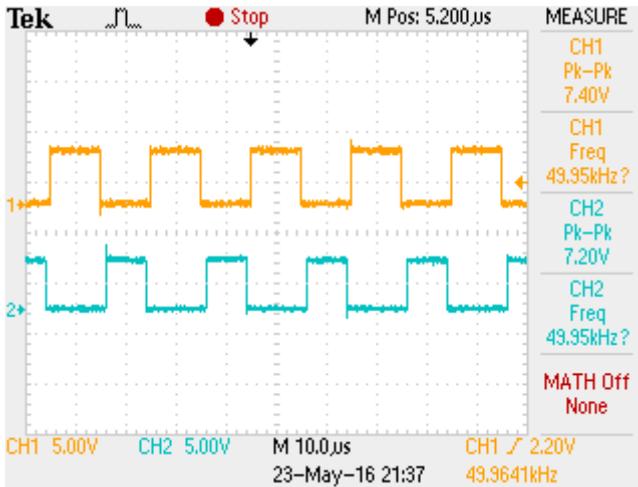
Konverter ini ditujukan untuk aplikasi pemanas induksi khususnya kompor induksi, sehingga untuk memastikan konverter ini bekerja maka dapat dilihat apakah panci berisi air yang dijadikan objek pemanasan menjadi panas atau tidak. Dari hasil pengujian panci dan air yang berada di dalam panci menunjukkan kenaikan suhu secara signifikan, artinya konverter ini sudah dapat bekerja. Selanjutnya baru diambil data-data penting untuk dilakukan analisa.

Berikut ini merupakan bentuk gelombang dari komponen-komponen pada konverter ini.

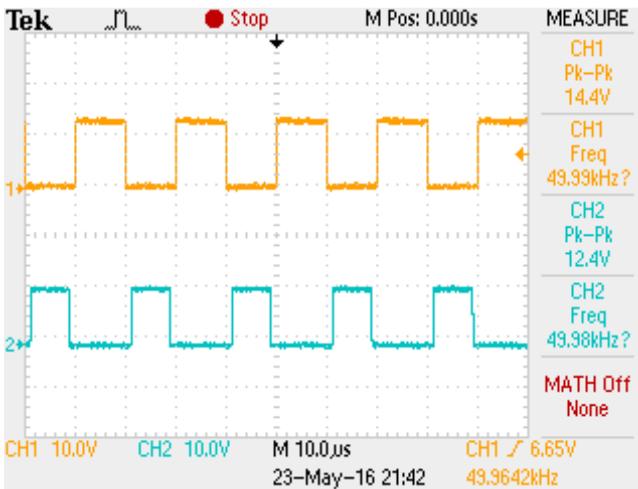
##### **4.1.1 Hasil Pengujian Sinyal PWM**

PWM pada rangkaian ini dibangkitkan dengan Arduino Mega 2560 yang include di dalam Arduino tersebut IC Atmega 2560. Untuk pembahasan mengenai metode pembangkitannya sudah dibahas pada bab-bab sebelumnya, pada bab ini akan diperlihatkan hasilnya.

PWM yang dibangkitkan untuk mendrive IGBT berjumlah dua sinyal, yang saling berlawanan (*inverting* dan *non-inverting*) dan diberi *deadtime* agar tidak terjadi kedua IGBT pada rangkaian dalam keadaan ON semua yang menyebabkan rangkaian tidak bekerja dengan semestinya. Akibat *deadtime* ini salah satu PWM akan memiliki *duty cycle* kurang dari 50 %, yaitu antara 45%-48% untuk memberikan waktu pada *deadtime*, pengaturan *dedtime* ini terdapat pada program Arduino, sedangkan sinyal PWM yang lainnya memiliki *duty cycle* 50 %. Sinyal PWM yang dibangkitkan dari Arduino bertegangan puncak 5 V, sedangkan setelah di *drive* dengan *gate driver* tegangan pencaknya menjadi 12 V. Dari gambar, tampak antara kedua sinyal tersebut terdapat *deadtime*, yang menyebabkan salah satu sinyal tidak memiliki *duty cycle* 50 %. Tampak pada sinyal PWM dibawah ini terdapat *deadtime*.



(a)

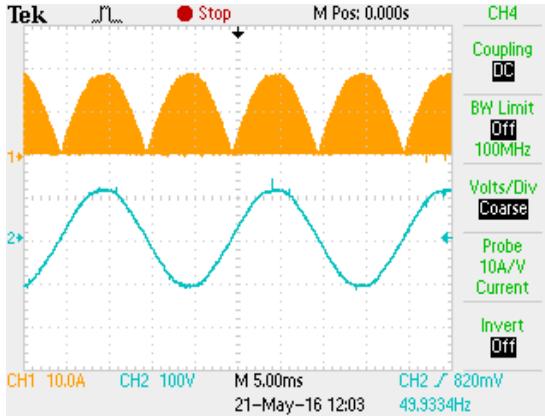


(b)

**Gambar 4.2** (a) Bentuk gelombang sinyal PWM yang dibangkitkan dari Arduino Mega 2560 (b) Bentuk gelombang sinyal PWM setelah diperkuat dengan rangkaian *gate driver* TLP 250

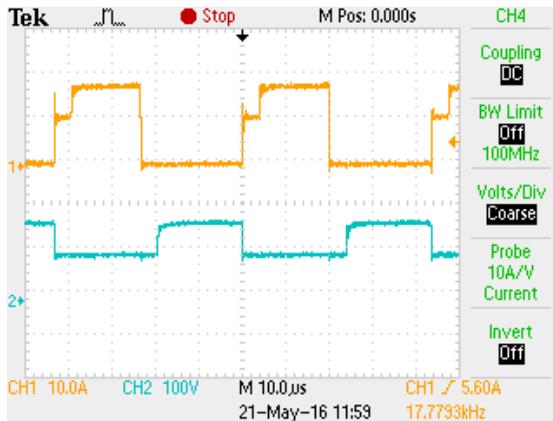
### 4.1.2 Hasil Pengujian Gelombang Input

Tegangan input yang digunakan pada konverter ini bersumber dari catu daya AC. Tegangan input yang digunakan untuk menguji memiliki nilai  $V_{rms}$  100 V. Kemudian input tersebut difilter dengan menggunakan filter kapasitor dan induktor. Tegangan input berbentuk gelombang sinusoidal.



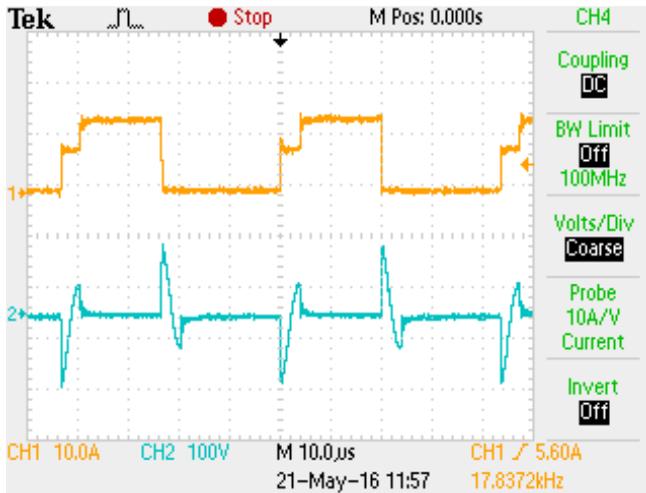
Gambar 4.3 Grafik berwarna biru merupakan tegangan input konverter

### 4.1.3 Hasil Pengujian Gelombang Dioda



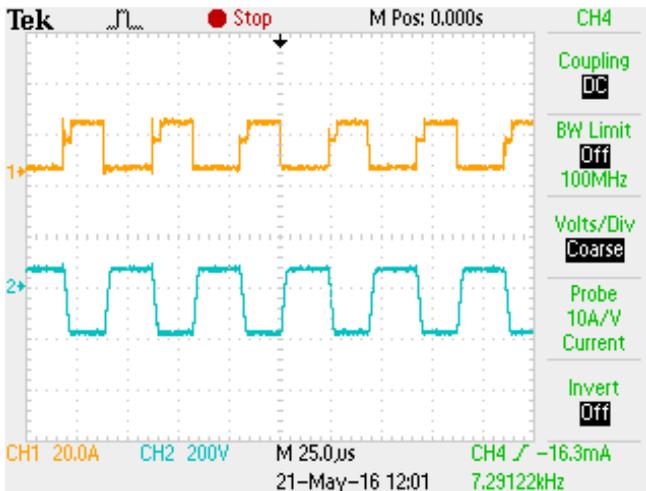
Gambar 4.4 Bentuk tegangan dioda (biru) terhadap IGBT

#### 4.1.4 Hasil Pengujian Gelombang IGBT



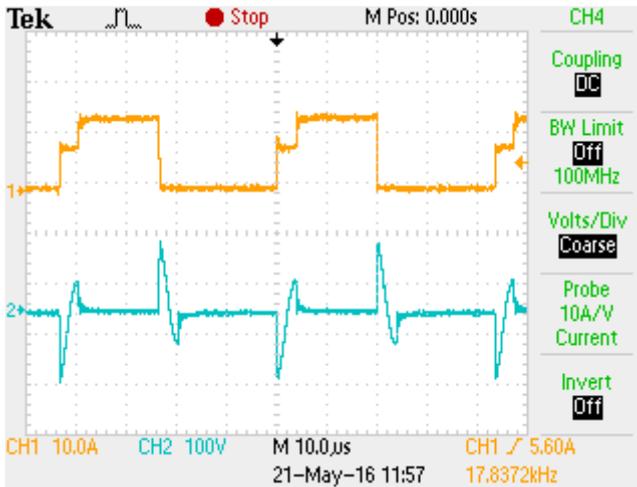
Gambar 4.5 Bentuk tegangan IGBT (kuning) terhadap tegangan output

#### 4.1.5 Hasil Pengujian Gelombang Kapasitor

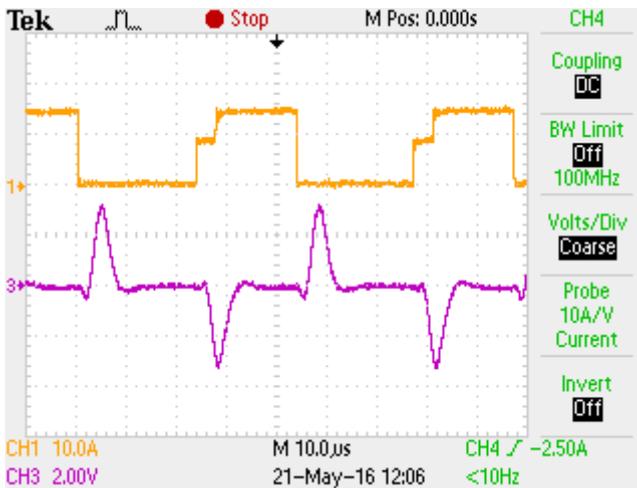


Gambar 4.6 Bentuk tegangan kapasitor resonan (biru) terhadap *switch*

#### 4.1.6 Hasil Pengujian Gelombang Output

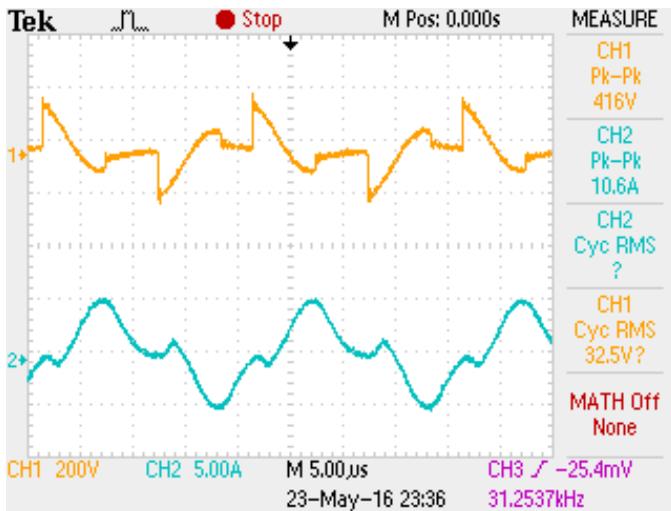


(a)

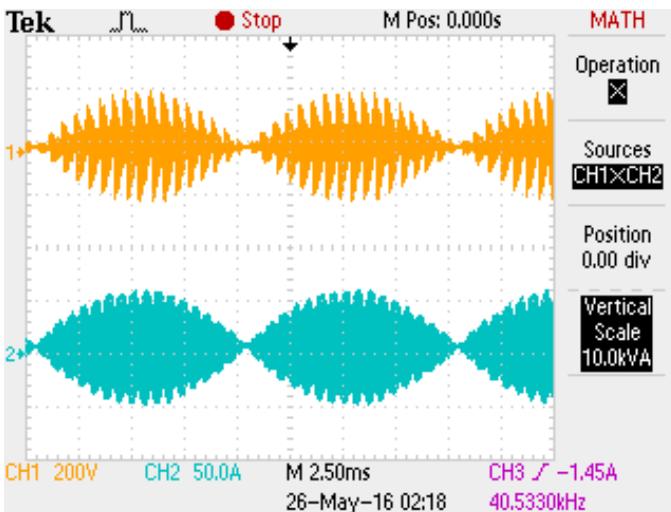


(b)

**Gambar 4.7** (a) Bentuk tegangan output (biru) terhadap IGBT (b) Bentuk arus output (ungu) terhadap IGBT



**Gambar 4.8** Gelombang arus (bawah) dan tegangan (atas) output pada frekuensi yang lebih tinggi (50 kHz)



**Gambar 4.9** Tegangan (atas) dan arus output (bawah) pada waktu yang lebih panjang

## **4.2 Hasil Pengujian Konverter Resonan AC-AC dengan ZCS (Zero Current Switching) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi**

Berikut ini merupakan data yang diambil dari pengujian konverter untuk dilakukan analisa, data yang akan dianalisa pada sub bab ini meliputi data pengujian daya konverter dan tegangan puncak konverter.

### **4.2.1 Hasil Analisa Pegujian Daya dan Kinerja Konverter**

Pengukuran daya output terhadap konverter ini sedikit sukar untuk dilakukan disebabkan oleh karakteristik dari rangkaian konverter ini menyebabkan perubahan nilai puncak dari tegangan dan arus output dalam frekuensi yang tinggi artinya nilai puncak dari tegangan dan output berubah begitu cepat karena konverter ini menggunakan frekuensi *switch* yang tinggi, sehingga alat ukur seperti wattmeter, osiloskop, maupun fluke kesulitan untuk mengukur nilai daya output yang sebenarnya dari konverter ini. Sehingga untuk mengukur daya output pada konverter ini, digunakan voltmeter dan amperemeter analog yang terdapat di laboratorium, kemudian hasil perkaliannya dikalikan dengan nilai faktor daya yang terbaca dalam osiloskop karena  $\cos \phi$  meter analog juga tidak dapat membaca faktor daya output dengan akurat. Metode tersebut dirasa paling memungkinkan dan logis untuk menentukan daya output. Pengukuran dengan cara ini menghasilkan perhitungan seperti pada tabel 4.1 dan 4.2, dengan faktor daya input dihitung dari  $\cos \phi$  meter sedangkan tegangan dan arus input sudah terbaca pada catu daya AC.

Pada pengujian kinerja konverter kali ini tegangan input yang digunakan 75 V, artinya bukan tegangan spesifikasi maksimal dari rancangan konverter, hal ini bertujuan agar lebih aman saat pengujian konverter. Begitu juga frekuensinya tidak sampai digunakan hingga 97 kHz seperti spesifikasi maksimal konverter agar lebih aman. Walaupun konverter juga diuji pada spesifikasi maksimal konverter dan bekerja dengan cukup baik dan cukup sesuai dengan teorinya. Namun untuk pengambilan data uji coba cukup digunakan tegangan dan frekuensi seperti pada tabel 4.1 dan 4.2.

Kemudian dari data yang diambil akan dilakukan pengolahan data untuk selanjutnya dilakukan analisa terhadapnya. Data yang diambil terhimpun pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

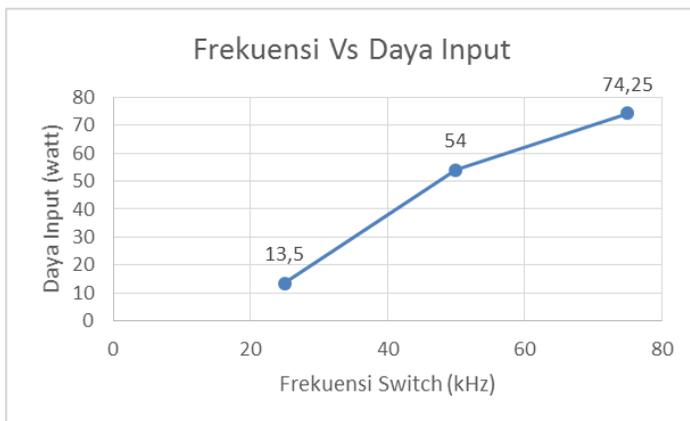
**Tabel 4.1** Perbandingan hasil pengukuran pada sisi input dan output

F(kHz)	Vin(V)	Iin(A)	Cos $\phi$ in	Vout (V)	Iout (A)	Cos $\phi$ out
25	75	0,2	0,9	28	0,6	0,6
50	75	0,8	0,9	49	1,2	0,7
75	75	1,1	0,9	58	1,5	0,7

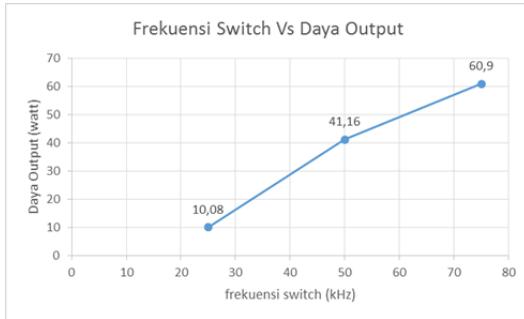
**Tabel 4.2** Tabel perubahan frekuensi terhadap lama pemanasan (mencapai suhu 55 derajat celcius)

Frekuensi (kHz)	Vinput (V)	Kisaran lama pemanasan (menit)
25	75	10
50	75	5
75	75	3

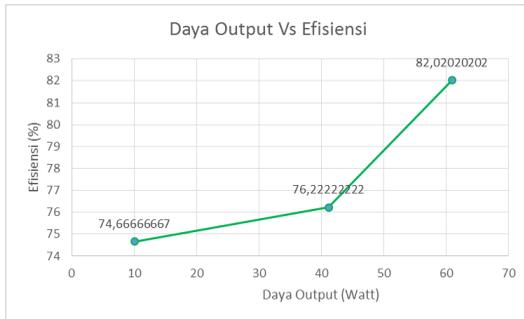
Dari hasil pengukuran diatas dapat dilakukan analisa melalui beberapa grafik berikut ini.



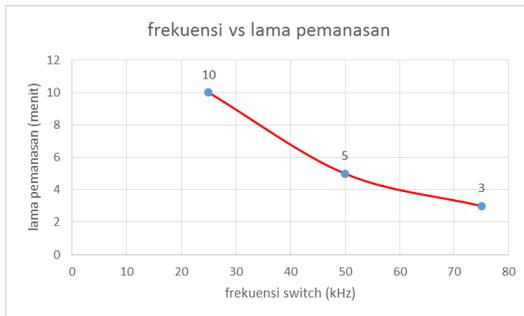
**Gambar 4.10** Grafik frekuensi vs daya input



**Gambar 4.11** Grafik frekuensi vs daya output

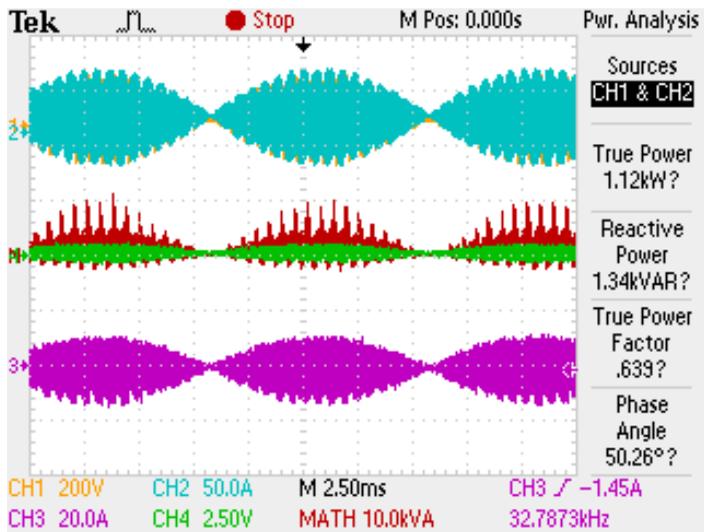


**Gambar 4.12** Grafik daya output vs efisiensi



**Gambar 4.13** Grafik frekuensi vs lama pemanasan

Dari keempat grafik tersebut dapat dianalisa bahwa bertambahnya frekuensi akan menambah daya input dan output, sementara bertambahnya daya output akan menambah efisiensi konverter walaupun rugi-rugi juga bertambah dengan bertambahnya frekuensi, namun daya output yang bertambah seiring bertambahnya frekuensi jauh lebih signifikan. Selanjutnya jika daya outputnya bertambah maka pemanasanpun akan berlangsung lebih cepat, artinya bertambahnya frekuensi akan mempersingkat waktu pemanasan beban.



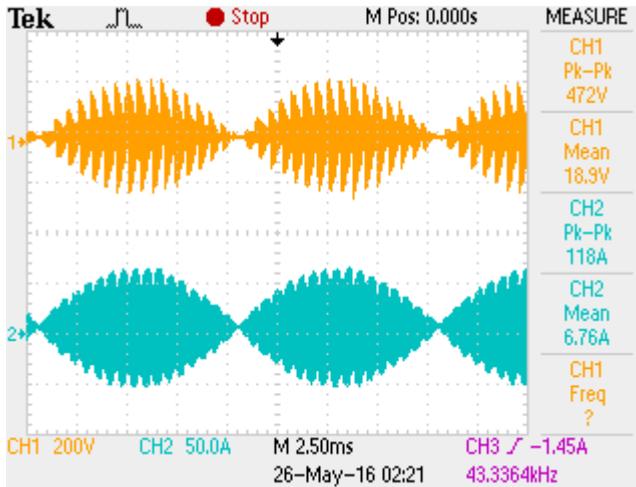
**Gambar 4.14** Fitur *power analyzer* pada osiloskop

Kemudian gambar 4.11 menunjukkan grafik gelombang pengukuran beserta nilainya menggunakan fitur *power analyzer* pada osiloskop.

#### 4.2.2 Hasil Analisa Tegangan Puncak Output (VCr)

**Tabel 4.3** Perbandingan nilai VCr dari perhitungan, simulasi, dan implementasi

VCr dari perhitungan (V)	VCr dari simulasi (V)	VCr dari pengujian (V)
132,558	132,64	236 V

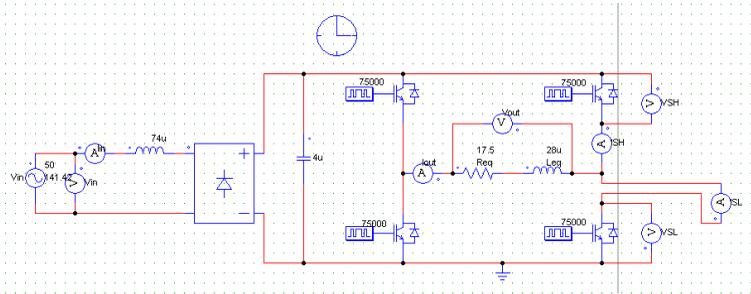


**Gambar 4.15** Grafik VCr pada osiloskop (kuning)

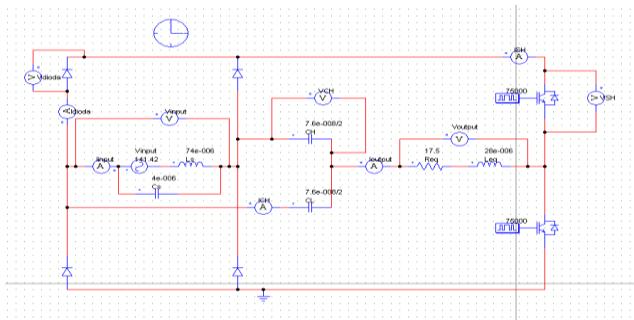
Tegangan puncak output pada implementasi lebih tinggi dibanding dengan simulasi dan perhitungan disebabkan nilai induktansi induktor beban yang berubah-ubah dan cenderung lebih tinggi dari saat pengukuran dan QIH-nya yang buruk. Sehingga VCr pun lebih tinggi karena *inductive voltage spike* cenderung naik apabila nilai induktansi dari beban induktif yaitu beban induktor dari konverter ini juga bertambah.

### 4.3 Analisa Perbandingan Konverter Resonansi AC-AC dengan ZCS (*Zero Current Switching*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi dengan Konverter Lain (*Non ZCS*) untuk Aplikasi Pemanasan Induksi

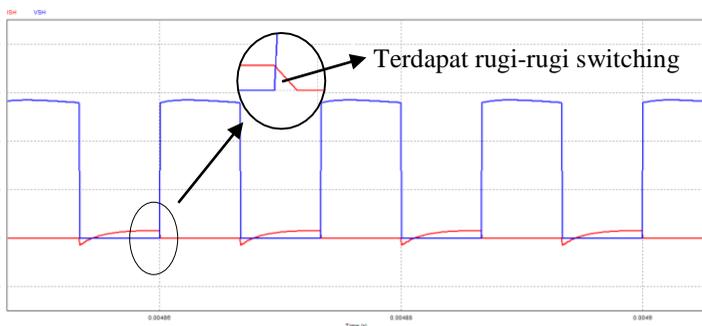
Selanjutnya akan dibandingkan melalui hasil simulasi dan perhitungan antara topologi konverter yang dikembangkan pada tugas akhir kali ini dan konverter lain yang bukan merupakan konverter resonansi *zero current switching*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *soft switching (zero current switching)* pada efisiensi konverter. Simulasi dilakukan menggunakan software PSIM, namun dikarenakan hasil dari simulasi PSIM terlalu ideal, maka untuk perhitungan rugi-rugi *switching* akibat topologi non *zero current switching* dilakukan melalui perhitungan manual.



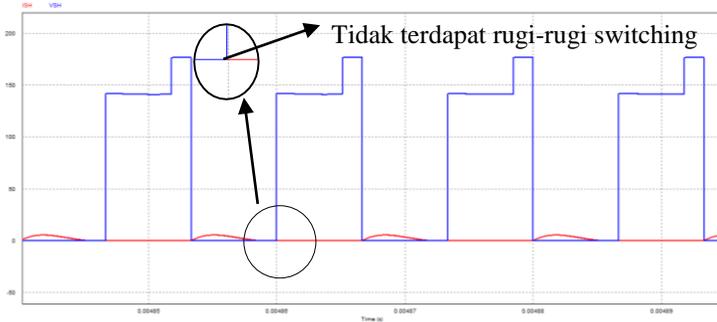
**Gambar 4.16** Topologi konverter *rectifier-dc link inverter* untuk aplikasi pemanas induksi tanpa ZCS



**Gambar 4.17** Topologi konverter resonan AC-AC dengan ZCS untuk aplikasi pemanas induksi



**Gambar 4.18** Bentuk gelombang arus (merah) dan tegangan (biru) pada *switch* dari topologi konverter gambar 4.13



**Gambar 4.19** Bentuk gelombang arus (merah) dan tegangan (biru) pada *switch* dari topologi konverter tugas akhir kali ini

Perhitungan rugi-rugi *switching* digunakan persamaan berikut :

$$P_{sw} = \frac{t_{sw,on} \times V_{off} \times I_{on} \times f_{sw}}{2} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana,

$P_{sw}$  = rugi-rugi *switching*

$t_{sw,on}$  = waktu IGBT menuju ke on, ( $t_{sw,on}$ ) = 1μS dari simulasi

$V_{off}$  = tegangan IGBT ketika off

$I_{on}$  = arus IGBT ketika on

$f_{sw}$  = frekuensi *switch*

**Tabel 4.4** Tabel hasil perhitungan dan simulasi dengan konverter ZCS dan non ZCS dengan input tegangan  $V_{rms}$  100 V dan frekuensi *switch* 75 kHz

Topologi Konverter	Time step (s)	Pin (W)	Switching losses (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
Non ZCS	1.075E-007	306,77	15,69	291,08	94,88
ZCS	1.12E-008	85,425	0	85,42	99,99

## LAMPIRAN

### 1. List Program Arduino Mega 2560 untuk membangkitkan sinyal PWM pada konverter ini.

```
#define F_CPU 16000000UL
#define FOUT 75000 // frekuensi pwm output yang diinginkan
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  TCCR1A = 0b11100010;
  TCCR1B = 0b00010001;
  unsigned long FPWM = (F_CPU / FOUT) / 2;
  ICR1 = FPWM;
  OCR1A = ICR1 / 2;
  OCR1B = 0;
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  OCR1B = 43;//waktu deadtime

}
```

### 2. List Program pada Matlab untuk Menghitung Cr, Daya Output, dan VCr

```
clear all
clc

for fsw = [25000;50000;75000;97000];%frekuensi switch yang ingin
diuji
Vac = 100;%tegangan input yang diinginkan
Leq = 28*(10^-6);
Req = 17.5;
ber = Req/(2*Leq);
Cr = (1/(Leq*((Req/(2*Leq))^2)+((2*(22/7)*97000)^2))))%nilai
kapasitor resonan
```

$$\omega_o = 1/\sqrt{L_{eq} \cdot C_r};$$

$$\omega_n = \sqrt{(\omega_o^2) - (ber^2)};$$

$$P_o = ((f_{sw} \cdot (V_{ac}^2)) / ((\omega_o^2) \cdot L_{eq})) \cdot (\coth((\pi \cdot ber) / (2 \cdot \omega_n))) \quad \% \text{ daya output}$$

$$V_{cr} = V_{ac} \cdot \sqrt{2} / (1 - (\exp(-ber \cdot (\pi / \omega_n)))) \quad \% \text{ tegangan puncak output end}$$

### 3. Foto konverter



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap simulasi maupun implementasi alat pada rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk Aplikasi Pemanasan Induksi dapat disimpulkan menjadi beberapa hal sebagai berikut.

1. Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk Aplikasi Pemanasan Induksi memiliki karakteristik akan bertambah daya outputnya apabila frekuensi switchnya juga bertambah.
2. Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk Aplikasi Pemanasan Induksi akan dapat memanaskan objek lebih cepat apabila daya outputnya semakin besar.
3. Kapasitor resonan pada Rangkaian Konverter Resonan AC-AC dengan *ZCS (Zero Current Switching)* untuk Aplikasi Pemanasan Induksi dapat mengurangi rugi-rugi pada arus saat switching.
4. *Voltage spike* yang cukup tinggi pada output dari rangkaian menyebabkan rangkaian ini membutuhkan rating komponen yang tinggi.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah.

1. Tugas akhir ini dapat dilanjutkan dengan menambahkan snubber untuk mengurangi lonjakan tegangan (*voltage spike*) saat terjadi pensaklaran.
2. Perancangan beban dari konverter ini yang lebih akurat dan berkualitas untuk menambah daya output konverter, memperbaiki performa konverter.
3. Perancangan konverter yang dapat digunakan untuk tegangan input dari PLN.
4. Penambahan kontrol *close loop* untuk menambah fitur dan efisiensi dari konverter.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Sarnago, O. Lucía, A. Mediano, and J.M. Burdío, "Efficient and Cost Effective ZCS Direct AC-AC Resonant Converter for Induction Heating," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 5, pp. 2546–2555, May 2014
- [2] Oscar Lucía, Pascal Maussion, Enrique J. Dede, and José M. Burdío, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges," IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 5, May 2014
- [3] Application Note, "Resonant Converter Topologies", STMicroelectronics, 1999
- [4] Szczesniak P., "Three-phase AC-AC Power Converters Basic on Matrix Converter Topology Matrix-rectance frequency concept". Springer. 2013
- [5] Hector Sarnago, Oscar Lucía, Arturo Mediano, and José M. Burdío, "Modulation Scheme for Improved Operation of an RB-IGBT-Based Resonant Inverter Applied to Domestic Induction Heating," IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 5, May 2013
- [6] Application Note, "Induction Cooking Everything You Need to Know", ON Semiconductor, 2014
- [7] Acero, J.M. Burdio, L.A. Barragin, D. Puyal, R. Alonso, "Frequency-Dependent Resistance in Litz- Wire Planar Windings for All-Metal Domestic Induction Heating Appliances," Dept. Ingenieria Electronics y Comunicaciones Universidad de Zaragoza, Dept. Fisica Aplicada Universidad de Zaragoza
- [8] Adrian Popovici, Viorel Popescu, Mircea Babaita, Dan Lascu, Dan Negoitescu, "Modeling, Simulation and Design of Input Filter for Matrix Converters," 2005 WSEAS Int. Conf. on Dynamical Systems and Control, Venice, Italy, November 2-4, 2005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Muhammad Abdika Azzakiy. Ia lahir pada tanggal 20 Juli 1993 di kota Bantul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Penulis dibesarkan di kota kelahirannya di Jogja, sampai akhirnya meneruskan studinya di kota Surabaya. Ia menempuh sekolah dasar di SDIT Bina Anak Sholeh Yogyakarta, kemudian dilanjutkan ke SMP dan SMA yang sama. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan S1 nya di Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya pada tahun 2012 untuk mewujudkan cita-citanya. Penulis memiliki hobi membaca dan

berolahraga, terutama futsal.