



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI  
HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATING**

**SKRIPSI**

**Handy Hermawan  
0806375873**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM EKSTENSI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI  
HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATING**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1**

**Handy Hermawan  
0806375873**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM EKSTENSI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil saya sendiri,  
dan semua sumber yang baik dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Handy Hermawan**

**NPM : 0806365873**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : Desember 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini di ajukan oleh :  
Nama : Handy Hermawan  
NPM : 0806365873  
Program Studi : Program Ekstensi Teknik Elektro  
Tanggal : Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency  
Induction Heating.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim M.Eng (.....)  
Penguji 1 : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng (.....)  
Penguji 2 : Dr. Ir. Ridwan Gunawan MT (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2010

## **KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH**

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Abdul Halim M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
3. kekasih dan sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Desember 2010

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Handy Hermawan

NPM : 0806365873

Program Studi : Program Ekstensi Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-Exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

### **Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih/formatkan, mengelolakan dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, memublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap menyantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Desember 2010

Yang menyatakan,

( Handy Hermawan )

## ABSTRAK

Nama : Handy Hermawan  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency  
Induction Heating

Pemanasan Induksi adalah proses pemanasan non kontak. Menggunakan listrik berfrekuensi tinggi untuk memanaskan bahan yang konduktif secara elektrik. Karena non kontak proses ini memiliki keunggulan yaitu tidak mencemari lingkungan sekitarnya. Hal ini juga sangat efisien karena panas dihasilkan pada benda kerja. Dapat dibandingkan dengan metode pemanasan lain di mana panas yang dihasilkan pada nyala api atau elemen pemanas, yang kemudian memanaskan benda kerja. Karena alasan-alasan tersebut mempertegas pemanasan induksi unik untuk beberapa aplikasi dalam industri.

Rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating pada system pemanasan benda kerja konduktif adalah sistem yang secara khusus dirancang untuk pemanas induksi untuk setiap aplikasi yang bertujuan memanaskan bahan atau benda kerja konduktif secara bersih, efisien dan terkendali. Dengan harapan dengan pengontrolan temperatur ini dapat memberikan hasil yang optimal serta efisiensi yang baik dalam penggunaan energi listrik.

Secara umum ada modul ini ada 4 bagian utama yaitu sumber tenaga listrik frekuensi tinggi yang telah dikontrol oleh satu unit mikrokontroler, sensor temperatur LM35 untuk memonitor panas yang terjadi pada benda kerja dan dapat memberikan *feedback* ke unit pengontrol, kumparan kerja (*work coil*) untuk menghasilkan medan magnet bolak-balik, sebuah benda kerja (*workpiece*) konduktif listrik yang akan dipanaskan. Juga di lengkapi beberapa komponen pendukung seperti LCD untuk *interfacing* status kerja sistem secara visual, LED, serta asesoris seperti potensiometer, switch, tombol kerja untuk penyetelan sistem, dan buzzer untuk alarm.

Kata kunci: listrik frekuensi tinggi, mikrokontroler, sensor temperatur LM35 benda kerja konduktif

## ABSTRACT

Nama : Handy Hermawan

Study Program : Electrical Engineering

Title : Design of Control System for High Frequency Induction Heating

Induction heating is a non-contact heating process. Using high-frequency electricity to heat the electrically conductive material. Because of this non-contact process has the advantage of not polluting the environment. It is also very efficient because the heat generated in the workpiece. Can be compared with other heating methods where heat is generated in the flame or heating element, which then heats the workpiece. Because of these reasons reinforce the unique induction heating for several applications in industry.

Design of control system for high frequency induction heating on conductive workpiece heating systems are systems that are specifically designed for induction heating for every application that aims to heat the conductive material or workpiece in a clean, efficient and controlled manner. With expectations by controlling the temperature can give results that optimal and good efficiency in the use of electrical energy.

In general there are modules have 4 main parts: a high frequency electric power source that has been controlled by a microcontroller unit, LM35 temperature sensor to monitor the heat that occurs in the workpiece and can give feedback to the controller unit, the coil of work (work coil) to produce alternating magnetic field, a workpiece to be heated electrically conductive. Also in complete several supporting components such as LCD for interfacing visual system working status, LED, and accessories such as potentiometers, switches, buttons work for adjusting the system, and buzzer for alarm.

Keywords:

high frequency power, microcontroller, temperature sensor LM35 conductive workpiece

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS TUGAS AKHIR .....	ii
PENGESAHAN TUGAS AKHIR .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH .....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3 TUJUAN PENULISAN .....	2
1.4 BATASAN MASALAH .....	2
1.5 METODOLOGI PENULISAN .....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN .....	4
<b>2. LANDASAN TEORI .....</b>	<b>5</b>
2.1 DESKRIPSI UMUM PEMANASAN INDUKSI .....	5
2.1.1 Proses Pemanasan Induksi .....	5
2.1.2 Longitudinal Elektromagnetik .....	7
2.2 APLIKASI PEMANASAN INDUKSI .....	10
2.3 RANGKAIAN PEMANASAN INDUKSI .....	12
2.3.1 Rangkaian Tangki Resonansi Seri .....	13
2.3.2 Rangkaian Tangki Resonansi Paralel .....	13
2.3.3 Pencocokan Impedansi .....	16
2.3.4 Rangkaian Kumpanan Kerja <i>LCLR</i> .....	19
2.3.5 Konsep Skematik .....	20

2.3.6	Toleransi Kesalahan .....	23
2.3.7	Metode Kontrol Daya .....	24
2.3.7.1	Memvariasikan tegangan DC .....	24
2.3.7.2	Memvariasikan rasio <i>duty cycle</i> pada inverter .....	24
2.3.7.3	Memvariasikan frekuensi operasi pada inverter .....	25
2.3.7.4	Memvariasikan nilai dari induktor di jaringan yang sesuai .....	26
2.3.7.5	Transformator pencocokan impedansi .....	27
2.3.7.6	Kontrol penggeser fasa <i>phase-shift</i> pada <i>H-bridge</i> .....	28
2.3.7.7	Kapasitor pemanasan induksi .....	28
2.4	MIKROKONTROLER ATMEL AT mega 16 .....	29
2.4.1	Blok Diagram .....	29
2.4.2	Konfigurasi Pin .....	30
2.4.3	Memori Mikrokontroler .....	32
2.4.3.1	Memori Program Flash .....	33
2.4.3.2	Memori Data SRAM .....	33
2.4.3.3	Memori Data EEPROM .....	34
2.4.4	Sistem <i>Clock</i> dan Pilihan <i>Clock</i> .....	34
2.4.5	Komunikasi Serial .....	36
2.4.6	Perangkat Komunikasi Serial .....	36
2.4.7	Port serial PC .....	38
2.4.8	Komunikasi serial pada mikrokontroller .....	39
2.4.9	Kecepatan transmisi .....	40
2.5	SENSOR TEMPERATUR LM35 .....	40
2.5.1	Prinsip Kerja LM35 .....	40
2.5.2	Penggunaan IC LM35 .....	41
<b>3.</b>	<b>PERANCANGAN SISTEM .....</b>	<b>43</b>
3.1	DESKRIPSI UMUM .....	43
3.1.1	Spesifikasi Sistem Pemanas Induksi .....	44
3.1.2	Perancangan Diagram Blok Sistem .....	45
3.2	PERANCANGAN SISTEM .....	46
3.2.1	Perancangan Perangkat Keras (Hardware) .....	46

3.2.2	Perancangan Perangkat Lunak .....	49
3.3	PERANCANGAN SISTEM KESELURUHAN .....	50
3.3.1	Realisasi Perangkat Keras .....	50
3.3.2	Realisasi Perangkat Lunak .....	53
<b>4.</b>	<b>PENGUJIAN DAN ANALISA SISTEM .....</b>	<b>55</b>
4.1	PENGUJIAN DAN ANALISA .....	55
4.2	METODOLOGI PENGUJIAN .....	55
4.3	PENGUJIAN TIAP BLOK .....	56
4.3.1	Pengujian rangkaian antar muka RS-232 .....	56
4.3.2	Komunikasi serial antara LM35 dengan mikrokontroler .....	57
4.3.3	Komunikasi serial antara LCD dengan mikrokontroler .....	60
4.3.4	Pengujian panel kontrol .....	62
4.3.5	Pengujian kumparan kerja menggunakan RCL meter .....	63
4.3.6	Pengujian tegangan keluaran $V_{out}$ yang dihasilkan sensor LM35 terhadap perubahan temperatur .....	64 63
4.4	PENGUJIAN SISTEM KESELURUHAN .....	66
4.4.1	Pengujian pemanas induksi tanpa benda kerja konduktif .....	66
4.4.2	Pengujian frekuensi kerja yang diberikan pada kumparan kerja .....	67 67
<b>5.</b>	<b>KESIMPULAN .....</b>	<b>69</b>
	DAFTAR ACUAN .....	71
	DAFTAR PUSTAKA .....	72
	LAMPIRAN .....	73

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Arus berfrekuensi tinggi menginduksi sebatang logam .....	6
Gambar 2.2	Sketsa multi lilitan solenoida rapat untuk perhitungan .....	7
Gambar 2.3	<i>Power density</i> pada pusat benda kerja .....	10
Gambar 2.4	Rangkaian tangki resonansi paralel .....	14
Gambar 2.5	Rangkaian tangki resonansi paralel dengan benda kerja terpisah ....	15
Gambar 2.6	Rangkaian tangki resonansi multi paralel .....	16
Gambar 2.7	Rangkaian tangki resonansi seri paralel .....	17
Gambar 2.8	Rangkaian tangki resonansi seri paralel $L_{match}$ dan $C_{match}$ .....	18
Gambar 2.9	Rangkaian inverter pemanas induksi <i>Half-Bridge</i> menggunakan kumparan kerja <i>LCLR</i> .....	20
Gambar 2.10	Rangkaian inverter pemanas induksi <i>Full - Bridge</i> menggunakan kumparan kerja <i>LCLR</i> .....	21
Gambar 2.11	Pemanas induksi <i>LCLR</i> menggunakan distribusi multiinverter .....	22
Gambar 2.12	Blok Diagram Atmega 16 .....	30
Gambar 2.13	Mikrokontroler kemasan 40-pin .....	30
Gambar 2.14	Peta memori program .....	33
Gambar 2.15	Peta memori data .....	34
Gambar 2.16	Distribusi Clock .....	35
Gambar 2.17	Data seri tak sinkron .....	36
Gambar 2.18	Pin DB9 .....	38
Gambar 2.19	IC LM35 .....	40
Gambar 2.20	Simbol IC LM35 .....	41
Gambar 3.1	Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction heating .....	45
Gambar 3.2	Rangkaian catu daya mikrokontroler .....	46
Gambar 3.3	Sistem minimum dari ATmega16 .....	47
Gambar 3.4	Rangkaian inverter menggunakan IC SG3524.....	47
Gambar 3.5	Rangkaian displai LCD dan perangkat <i>interface</i> .....	49

Gambar 3.6	Diagram alir sistem kendali pemanas induksi .....	49
Gambar 3.7	(a) $L_{match}$ ; (b) $C_{match}$ ; (c) $L_{work}$ ; (d) $C_{work}$ .....	51
Gambar 3.8	(a) $V_{in}$ yang dihasilkan inverter, (b) $V_L$ tegangan pada kumparan kerja, (c) $I_L$ Arus yang mengalir pada kumparan kerja saat terjadi pembebanan .....	52
Gambar 3.9	Realisasi perangkat keras Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating .....	53
Gambar 4.1	Pengukuran rangkaian antar muka serial .....	56
Gambar 4.2	Pengujian koneksi LM35.....	58
Gambar 4.3	Penggunaan Koneksi LM35 pada hyper terminal .....	58
Gambar 4.4	Port Setting pada com 2 .....	59
Gambar 4.5	Hasil eksekusi pada hyper terminal .....	59
Gambar 4.6	Tampilan 1 pengendali temperatur pada LCD .....	61
Gambar 4.7	Tampilan 2 <i>set point</i> pada LCD .....	61
Gambar 4.8	Tampilan 3 <i>set overheat</i> pada LCD .....	62
Gambar 4.9	Pengujian kontrol panel pada sistem pemanas induksi .....	62
Gambar 4.10	Pengukuran induktansi kumparan kerja 40 lilitan menggunakan LCR meter.....	63
Gambar 4.11	Pengukuran induktansi kumparan kerja 35 lilitan menggunakan LCR meter.....	64
Gambar 4.12	Grafik kenaikan temperatur terhadap $V_{out}$ (mV) LM35 .....	65
Gambar 4.13	Frekuensi keluaran inverter 27kHz pada kumparan kerja .....	66
Gambar 4.14	Bentuk gelombang arus pada tangki resonansi paralel .....	67
Gambar 4.15	Frekuensi 27kHz pada kumparan kerja .....	67
Gambar 4.16	Bentuk gelombang arus pada tangki resonansi paralel .....	69

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik standar EIA .....	37
Tabel 2.2	Karakteristik port serial komputer .....	38
Tabel 2.3	Varian LM35 .....	41
Tabel 3.1	Spesifikasi sistem pemanas induksi .....	44
Tabel 4.1	Data hasil pengukuran rangkaian antar muka RS-232 .....	57
Tabel 4.2	Pengujian instrument pada panel kontrol .....	63
Tabel 4.3	Data pengukuran sensor temperatur LM35 .....	65

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Listing program Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating .....	73
Lampiran 2	IGBT FGA15N120AND .....	78
Lampiran 3	IC SG3524 Regulator Modulasi Lebar Pulsa .....	87

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG MASALAH**

Seiring dengan kemajuan teknologi saat ini, proses pemanasan benda kerja konduktif yang menggunakan energi listrik akan menjadi semakin efisien dalam penggunaan energi listrik yang dihasilkan pada alat pemanas. Pada peralatan pemanas konvensional yang menggunakan elemen pemanas yang sering digunakan di industri maupun di rumah tangga tingkat efisiensinya cukup rendah karena proses pemanasan benda kerja tidak langsung diserap pada benda kerja konduktif. Panas yang dihasilkan elemen pemanas turut diserap oleh udara yang ada disekitar elemen pemanas. Pemanas induksi lebih cepat dan lebih hemat energi dari pemanas listrik tradisional. Karena pemanas induksi memanaskan secara langsung terhadap benda kerja konduktif.

Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating pada sistem pemanasan benda kerja konduktif adalah sistem yang secara khusus dirancang untuk pemanas induksi untuk setiap aplikasi yang bertujuan memanaskan bahan atau benda kerja konduktif secara bersih, efisien dan terkendali. Dengan harapan dengan pengontrolan frekuensi ini dapat memberikan hasil yang optimal serta efisiensi yang baik dalam penggunaan energi listrik.

Pada tugas akhir ini akan direalisasikan rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating yaitu pemanas induksi yang dirancang secara khusus dalam skala kecil. Sistem ini dilengkapi oleh sistem kendali temperatur agar dapat menyesuaikan kebutuhan panas yang diinginkan, juga memiliki respon yang baik terhadap gangguan lingkungan sehingga sistem ini dapat bekerja dengan baik.

Keunggulan dari alat ini antara lain, sistem pemanasan benda kerja konduktif lebih cepat jika dibandingkan pemanas konvensional, lebih efisien dalam penggunaan energi listrik. Panas yang dihasilkan akan sesuai dengan

temperatur yang diinginkan dengan menggunakan kontrol loop tertutup sehingga tingkat kesalahan pada sistem ini dapat diminimalisasi.

## **1.2 PERUMUSAN MASALAH**

Berdasarkan latar belakang maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut :

1. Merancang dan membuat sistem pemanas induksi yang aman dan efisien dalam penggunaan energi listrik.
2. Bagaimana sistem kendali dapat mengontrol pemanas induksi agar temperatur yang dihasilkan dapat sesuai dengan temperatur yang diinginkan.

## **1.3 TUJUAN PENULISAN**

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating pada sistem pemanasan benda kerja konduktif dengan kapasitas kecil yang dilengkapi oleh sistem pengendali agar sistem dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan.

## **1.4 BATASAN MASALAH**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dibuat pada tugas akhir ini merupakan perangkat simulasi rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating adalah sistem pemanas induksi yang memiliki respon yang baik dan akurat terhadap temperatur yang dihasilkan serta aman dalam mengaplikasikannya.
2. Pada rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating terdapat beberapa bagian perangkat keras yang akan diintegrasikan antara lain suplai daya, inverter, rangkaian pengendali mikrokontroler ATmega 16, sensor temperatur LM35, display LCD dan tombol pengaturan.
3. Pada bagian perangkat lunak, pemrograman ATmega 16 ini menggunakan bahasa BASIC yang terhubung dengan komputer melalui port serial untuk membuat program dan dapat langsung bekerja sendiri (*mode stand-alone*).

## 1.5 METODOLOGI PENULISAN

Metodologi pembuatan Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency ini dibagi menjadi 5 tahap, yaitu :

1. Tahap persiapan : pada tahapan ini, dilakukan konsolidasi dengan dosen pembimbing untuk menyamakan persepsi mengenai sistem yang akan dibangun dan mencari ide-ide serta literatur-literatur yang berkaitan dengan sistem yang akan dibangun.
2. Tahap studi literatur : pada tahapan ini, memfokuskan pada studi literatur dari pengembangan sistem yang telah dilakukan oleh para peneliti dibidang ini (jika ada) dan mencari jalan keluar kemungkinan pengembangan pemanas induksi . *Review* terhadap jurnal-jurnal nasional maupun internasional akan dilakukan. Pada akhir tahapan ini, akan dilakukan persiapan alat-alat pendukung pada laboratorium untuk konstruksi rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating.
3. Tahap Konstruksi : pada tahapan ini, pembelian komponen-komponen pemanas induksi akan dilakukan. Rancang bangun sistem kendali high frequency induction heating digambarkan oleh komputer agar dapat mensimulasikan gambaran sebenarnya. Kemudian dari hasil penggambaran di komputer akan dilakukan konstruksi di laboratorium.
4. Tahap Evaluasi : setelah tahap konstruksi selesai akan dilakukan tahapan evaluasi yang dimaksudkan untuk menguji apakah sistem kendali pemanas induksi yang telah dibuat dapat berfungsi dengan baik. Evaluasi akan dilakukan baik dilihat dari sisi teknis, ekonomis dan estetika. Jika diperlukan, modifikasi konstruksi sistem kendali pemanas induksi akan dilakukan untuk menghasilkan sistem kendali pemanas induksi yang handal.
5. Tahap Hasil dan Pelaporan : pada tahap ini, sistem kendali pemanas induksi telah dirancang bangun sebanyak 1 unit. Pelaporan akan diberikan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam pembahasan laporan tugas akhir ini tersiri dari 5 bab, pada bab satu membahas tentang latar belakang, tujuan yang ingin dicapai, perumusan masalah, batasan masalah, metodologi penyelesaian, dan sistematika penulisan.

Bab dua berisi teori dasar yang membahas tentang teori-teori pendukung yang digunakan dalam penyelesaian masalah dalam tugas akhir ini. Hal-hal yang dibahas antara lain : pemanas induksi, mikrokontroler, komunikasi serial, real-time clock, BASCOM AVR, sensor temperatur.

Pada bab tiga adalah perancangan dan realisasi, yang membahas perancangan dan realisasi, antara lain : spesifikasi alat, pemilihan komponen, perancangan alat dan realisasi alat.

Pada bab empat adalah pengujian dan analisa alat yang telah direalisasikan. Menjelaskan informasi lengkap mengenai pengujian dan analisa yang dilakukan terhadap alat secara keseluruhan. Pengujian dibagi menjadi dua tahapan yaitu pengujian secara lab dan pengujian pengujian di lapangan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari alat, serta untuk mengetahui apakah alat bekerja sesuai dengan spesifikasi atau tidak.

Bab terakhir yang berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembuatan Proyek Akhir serta saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut dari alat yang direalisasikan.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 DESKRIPSI UMUM PEMANASAN INDUKSI**

Pada proses pemanasan non kontak menggunakan listrik berfrekuensi tinggi untuk memanaskan bahan yang konduktif secara elektrik. Karena non kontak proses ini memiliki keunggulan yaitu tidak mencemari lingkungan sekitarnya. Dapat dikatakan efisien karena panas yang dihasilkan pada benda kerja dapat dibandingkan dengan metode pemanasan lain dimana panas yang dihasilkan pada nyala api atau elemen pemanas, yang kemudian memanaskan benda kerja. Karena alasan-alasan tersebut pemanasan induksi unik untuk beberapa aplikasi dalam industri maupun rumah tangga.

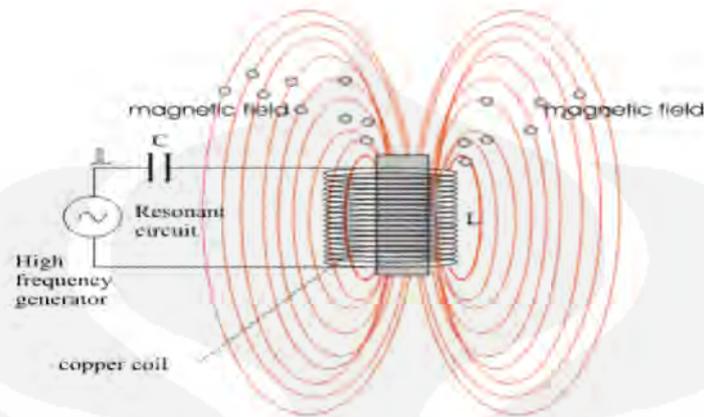
##### **2.1.1 Proses Pemanasan Induksi**

Pemanasan induksi adalah metode pemanasan cepat yang konsisten untuk pembuatan aplikasi yang melibatkan ikatan atau mengubah sifat-sifat logam atau bahan elektrik-konduktif lainnya. Proses ini bergantung pada arus listrik yang disebabkan di dalam material untuk menghasilkan panas.

Sebuah sumber listrik frekuensi tinggi digunakan untuk menggerakkan arus bolak-balik yang besar melalui kumparan. Kumparan ini dikenal sebagai kumparan kerja, bagian dari arus yang melalui kumparan ini menghasilkan medan magnet yang kuat dan cepat berubah didalam ruang kumparan kerja. Benda kerja yang akan dipanaskan ditempatkan dalam pergantian medan magnet yang kuat. Medan magnet yang dihasilkan tergantung pada sifat bahan benda kerja. Pergantian medan magnet mendorong adanya arus di benda konduktif. Gambar 2.1. menggambarkan proses pemanasan induksi.

Pada gambar terlihat sebuah logam ditempatkan dalam kumparan tembaga dengan cepat mencapai temperatur tinggi dengan arus induksi dari medan magnet yang sangat terkonsentrasi [1]. Susunan kumparan kerja dan benda kerja dapat dianggap sebagai sebuah transformator listrik. Kumparan kerja seperti energi

listrik utama di mana diumpungkan, dan benda kerja seperti kumparan sekunder yang dihubungkan singkat.



Gambar 2.1. Arus berfrekuensi tinggi menginduksi sebatang logam

Hal ini menyebabkan arus mengalir melalui benda kerja. Ini dikenal sebagai arus eddy. Selain itu, frekuensi tinggi yang digunakan dalam aplikasi induksi pemanas menimbulkan fenomena yang disebut efek kulit. Efek kulit ini memaksa pergantian arus di dalam lapisan tipis terhadap permukaan benda kerja. Efek kulit efektif meningkatkan ketahanan logam terhadap bagian dari arus besar. Oleh karena itu sangat meningkatkan efek pemanasan yang disebabkan oleh arus induksi dalam benda kerja. Meskipun pemanasan akibat arus eddy yang diinginkan pada aplikasi ini, menarik perlu dicatat bahwa produsen trafo berusaha keras untuk menghindari fenomena ini dalam inti transformator yang mereka buat. Laminasi inti besi digunakan untuk mencegah arus eddy mengalir di dalam inti trafo. Di dalam sebuah transformator perjalanan arus eddy adalah sangat tidak diinginkan karena menyebabkan pemanasan inti magnetik dan merupakan kekuatan yang terbuang. Untuk logam besi dan beberapa jenis baja diperlukan mekanisme tambahan yang terjadi pada saat yang sama dengan arus eddy yang disebutkan diatas.

Medan magnet yang kuat di dalam kumparan bolak bekerja berulang-ulang magnetises dan de-magnetises kristal besi. Ini membalik cepat dari domain magnetik menyebabkan friksi yang cukup dan pemanasan di dalam material. Pemanasan karena mekanisme ini dikenal sebagai kerugian histeresis, dan kerugian terbesar untuk bahan yang memiliki luasan besar di dalam kurva  $BH$ .

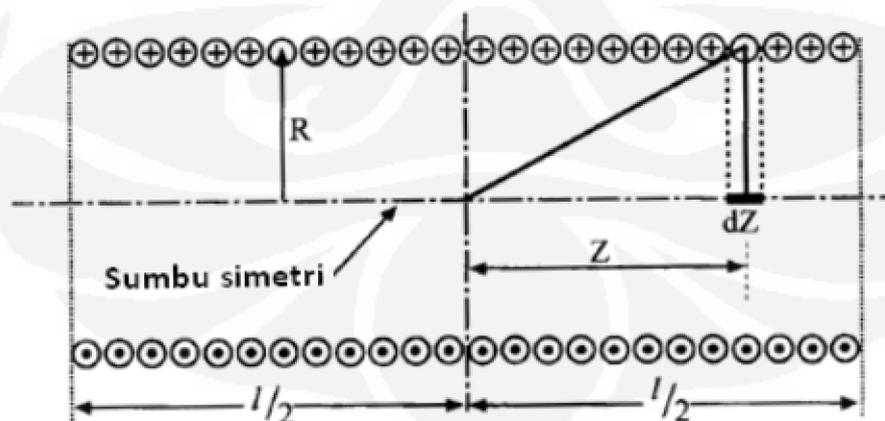
Hal ini dapat menjadi faktor besar untuk panas yang dihasilkan selama pemanasan dengan induksi, tapi hanya terjadi di dalam bahan besi. Untuk alasan ini bahan besi lebih mudah untuk pemanasan dengan induksi dari bahan non-ferrous.

Menarik untuk dicatat bahwa kehilangan sifat magnetik baja ketika dipanaskan di atas sekitar  $700^{\circ}\text{C}$ . Temperatur ini dikenal sebagai temperatur Curie. Ini berarti bahwa di atas  $700^{\circ}\text{C}$  tidak ada pemanasan material akibat kerugian histeresis. Setiap pemanasan lebih lanjut bahan tersebut diinduksi akibat arus eddy. Hal ini membuat pemanas baja di atas  $700^{\circ}\text{C}$  lebih merupakan tantangan bagi sistem pemanas induksi. Terdapat fakta bahwa tembaga dan aluminium keduanya non-magnetik dan konduktor listrik yang sangat baik, juga dapat membuat bahan-bahan tersebut merupakan tantangan terhadap efisiensi panas.

### 2.1.2 Longitudinal Elektromagnetik

Distribusi medan magnet sepanjang sumbu di ujung pada kumparan solenoida ideal (heliks) dapat diperoleh relatif mudah menggunakan asumsi distribusi medan magnetik dalam loop tunggal pada sebuah kawat. Asumsi dari sebuah solenoida ideal menganggap kondisi sebagai berikut:

- Lilitan solenoida secara ketat menggunakan kawat tipis.
- Arus kumparan didistribusikan secara tidak beraturan dalam setiap lilitan.
- Tidak ada benda elektrik konduktif terletak dalam jarak dekat solenoida.



Gambar 2.2. Sketsa multi lilitan solenoida rapat untuk perhitungan.

Pada gambar 2.2 menunjukkan sketsa panjang solenoid ideal  $L$  dan jari-jari  $R$  yang memiliki lilitan  $N$  ketat. Arus membawa loop kosong menghasilkan medan magnet  $B$  sepanjang sumbu  $Z$  dengan komponen sesuai dengan persamaan berikut:

$$B_z = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana  $Z$  adalah jarak sumbu dari loop ke area kerja, ini adalah loop arus dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang bebas (ruang hampa),  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  H/m. [atau Wb/(A\*m)]. Medan magnet di pusat lingkaran kosong dapat diperoleh dengan asumsi  $Z = 0$  dalam persamaan 2.1.

Sehingga diperoleh

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2R} \dots\dots\dots (2.2)$$

Distribusi medan magnet sepanjang sumbu dari suatu solenoida kosong dapat diperoleh dengan perluasan  $B_z$  dari sebuah loop tunggal pada kawat kumparan multi-lilitan. Asumsi lilitan solenoida rapat ternyata memberikan kontribusi kecil  $dZ$  akan membawa arus total di tengah solenoid

$$dB_z = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}} \frac{NI}{l} dZ = \frac{\mu_0 R^2 NI}{2l} \left( \frac{dZ}{(R^2 + Z^2)^{3/2}} \right) \dots\dots (2.3)$$

Medan magnet berada pada pusat kumparan dapat diperoleh dengan nilai distribusi dari semua bagian yang membawa arus. Oleh karena itu, setelah integrasi  $dB_z$  sepanjang kumparan medan magnet pada pusat kumparan kerja dapat ditulis sebagai

$$B_z = \frac{\mu_0 R^2 NI}{2l} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dZ}{(R^2 + Z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Setelah operasi matematika sederhana besarnya medan pada sumbu di tengah solenoid akan menjadi

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{(4R^2 + l^2)}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Jika panjang solenoida jauh lebih besar daripada radius  $l \gg R$  maka itu adalah mungkin untuk  $R$  mengabaikan sehubungan dengan  $l$  dan persamaan 2.4 dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{l} \dots\dots\dots (2.6)$$

Persamaan ini diketahui untuk medan sumbu  $B$  di pusat sebuah solenoida panjang elektromagnetis. Adalah mungkin untuk menunjukkan bahwa dengan membiarkan batas yang sesuai pada persamaan 2.4, persamaan 2.1 dan 2.4 dapat diubah menjadi

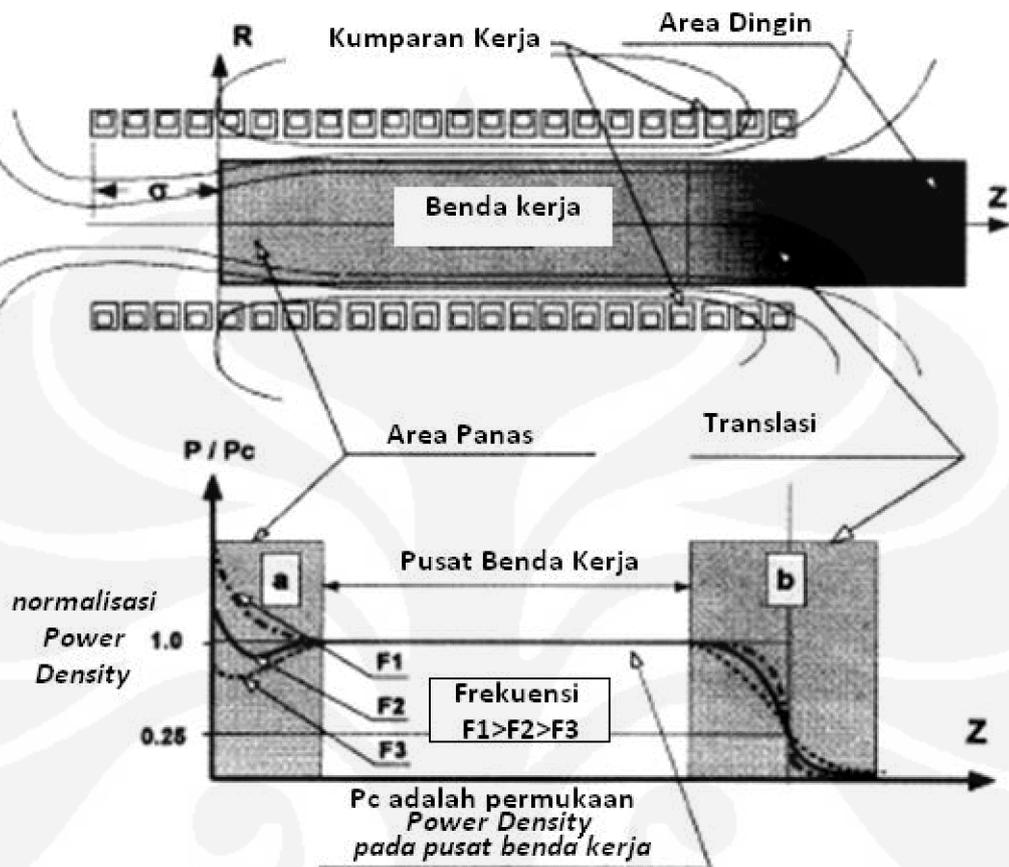
$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{2\sqrt{(R^2 + l^2)}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Untuk panjang kumparan elektromagnetis persamaan 2.7 dapat diperkirakan sebagai

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{2l} \dots\dots\dots (2.8)$$

Oleh karena itu, perbandingan persamaan 2.6 dan persamaan 2.8 menunjukkan bahwa pada ujung kumparan kosong dengan kerapatan fluks magnet  $B_z$  nilainya turun menjadi satu setengah di pusat. Hal yang sama akan berlaku untuk panjang kumparan elektromagnetik multi lilitan dengan benda non-magnetik homogen panjang tak terhingga.

Gambar 2.3 menunjukkan distribusi intensitas medan magnet di sepanjang kumparan kerja. Dapat dilihat bahwa kepadatan arus induksi di ujung bawah kumparan kerja adalah dua kali lebih kecil dari pusat kumparan. Ini berarti bahwa *power density* di bawah ujung kumparan adalah sama dengan seperempat dari yang di pusat ( $P_{ujung} = 0,25 * P_{pusat}$ ).



Gambar 2.3. Power density pada pusat benda kerja

Panjang zona b tergantung pada efek kulit dalam benda yang dipanaskan, rasio kumparan di dalam radius dua benda kerja dan faktor ruang  $K_{\text{ruang}}$  lilitan kumparan dan mungkin selama waktu kumparan atau perbedaan udara sama antara kumparan dan beban.

## 2.2 APLIKASI PEMANASAN INDUKSI

Pemanas induksi dapat digunakan untuk setiap aplikasi untuk memanaskan bahan konduktif listrik secara bersih, efisien dan terkendali. Berikut aplikasi yang paling umum yaitu:

- Pengerasan logam (*steel treatment*)

Pengerasan pada logam amunisi, gigi roda gigi, melihat pisau dan poros penggerak (*drive shaft*) juga aplikasi umum karena proses induksi memanaskan permukaan logam yang sangat cepat. Oleh karena itu dapat

digunakan untuk pengerasan permukaan, dan pengerasan area lokal bagian logam dengan konduksi panas lebih dalam ke bagian atau ke daerah sekitarnya. Sifat non kontak pemanasan induksi juga berarti bahwa dapat digunakan untuk memanaskan material dalam aplikasi analitis tanpa risiko mencemari spesimen. Aplikasi lain meliputi peleburan, pengelasan, mematri pada logam, induksi memasak *hobs* dan *rice cooker*.

- Proses sterilisasi pada peralatan medis

Peralatan medis material logam dapat disterilkan dengan pemanasan temperatur yang tinggi sementara peralatan tersebut masih disegel di dalam lingkungan steril untuk membunuh kuman.

- Penyegel tutup botol obat dan minuman

Penyegel anti-tamper seal yang menempel di bagian atas botol obat dan botol minuman. Penyegel ini kemudian dipanaskan dengan cepat melewati pemanas induksi pada *line* produksi. Sebuah foil dilapisi dengan lem khusus yang dimasukkan ke dalam topi plastik dan bagian atas setiap botol selama manufaktur. Panas yang dihasilkan dapat mencairkan lem sehingga tutup botol dan botol akan tersegel dengan baik sehingga mencegah penyalahgunaan atau kontaminasi dari isi botol sampai menembus foil.

- *Getter firing*

Aplikasi lain yang umum adalah "getter firing" untuk menghilangkan kontaminasi dari tabung seperti tabung gambar televisi, tabung vakum, dan berbagai lampu gas discharge. Sebuah cincin dari bahan konduktif disebut getter ditempatkan dalam bejana kaca. Karena pemanas induksi adalah proses non-kontak itu dapat digunakan untuk panas pengambil yang sudah disegel di dalam pipa. Sebuah kumparan induksi bekerja terletak dekat dengan getter pada bagian luar tabung vakum dan sumber AC dihidupkan. Pemanas induksi mulai bekerja, getter adalah air panas putih, dan bahan kimia dalam pelapisan yang bereaksi dengan gas di vakum. Hasilnya adalah bahwa getter menyerap sisa terakhir bekas apapun gas di dalam tabung vakum dan meningkatkan kemurnian vakum.

- Zona pemurnian digunakan dalam industri manufaktur semikonduktor

Proses di mana silikon dimurnikan dengan zona bergerak dari bahan cair yang dilewatkan pada koil induksi.

### 2.3 RANGKAIAN PEMANASAN INDUKSI

Secara teori hanya 3 hal yang penting untuk melaksanakan pemanasan induksi:

1. Sebuah sumber tenaga listrik frekuensi tinggi,
2. Sebuah kumparan bekerja untuk menghasilkan medan magnet bolak balik,
3. Sebuah benda konduktif listrik yang akan dipanaskan,

Dalam mengaplikasikannya akan menjadi cukup kompleks, misalnya pencocokan impedansi jaringan sering diperlukan antara sumber frekuensi tinggi dan kumparan kerja untuk memastikan transfer daya yang baik. Pada peralatan pemanas induksi kapasitas besar diperlukan sistem air pendingin yang umum di pemanas induksi daya tinggi untuk membuang limbah panas dari kumparan kerja, jaringan yang sesuai dengan dan elektronika daya. Sehingga diperlukan pengendali untuk mengontrol intensitas aksi pemanasan, dan waktu siklus pemanasan untuk memastikan hasil yang konsisten. Pengendali juga melindungi sistem agar tidak rusak oleh beberapa kondisi operasi yang merugikan. Namun prinsip dasar pengoperasian setiap pemanas induksi tetap sama seperti dijelaskan sebelumnya.

Dalam prakteknya kumparan kerja biasanya dimasukkan ke dalam sebuah rangkaian tangki resonan yang terdiri atas induktor dan kapasitor. Ini memiliki sejumlah keunggulan, baik itu membuat arus atau tegangan gelombang menjadi sinusoidal. Hal ini meminimalkan kerugian ini di inverter dengan memungkinkan untuk mendapatkan keuntungan dari *zero-voltage-switching* atau *zero-current-switching* tergantung pada pengaturan yang tepat dipilih. Bentuk gelombang sinusoidal pada kumparan kerja juga merupakan sinyal yang lebih murni dan menyebabkan *interference* frekuensi radio terhadap peralatan yang berada didekatnya. Titik ini kemudian menjadi sangat penting dalam sistem yang memiliki daya tinggi.

Ada sejumlah skema resonansi bahwa perancang pemanas induksi dapat memilih untuk bekerja kumparan:

### **2.3.1 Rangkaian Tangki Resonansi Seri**

Kumparan kerja dibuat untuk beresonansi pada frekuensi operasi dimaksudkan dengan sebuah alat kapasitor ditempatkan secara seri dengan itu. Hal ini menyebabkan arus melalui kumparan kerja menjadi sinusoidal. Resonansi seri juga meningkatkan tegangan pada kumparan kerja, jauh lebih tinggi dari tegangan output dari inverter sendirian. Pada inverter beban sinusoidal harus membawa arus penuh yang mengalir pada koil kerja. Sehingga kumparan kerja terdiri dari banyak lilitan kawat dapat mengalirkan beberapa atau puluhan amper. Daya pada pemanas yang signifikan dapat dicapai dengan meningkatkan resonansi tegangan di susunan resonansi seri kumparan kerja sementara menjaga arus melalui kumparan (dan inverter) ke tingkat yang sesuai.

Susunan ini biasanya digunakan dalam hal-hal seperti *rice cooker* dimana tingkat daya rendah, dan inverter terletak di sebelah objek yang akan dipanaskan. Kekurangan utama dari pengaturan inverter resonansi seri adalah bahwa harus membawa arus yang sama yang mengalir pada kumparan kerja. Selain itu kenaikan tegangan karena resonansi seri bisa menjadi sangat jelas jika tidak ada ukuran benda kerja yang tepat pada kumparan kerja. Ini bukan masalah dalam aplikasi seperti *rice cooker* dimana benda kerja selalu alat memasak yang sama.

Kapasitor tangki biasanya memiliki rating tegangan tinggi karena penyetelan pada rangkaian menyebabkan kenaikan tegangan resonansi. Hal ini juga harus membawa arus penuh yang dibawa oleh kumparan kerja, meskipun hal ini biasanya tidak menjadi masalah di aplikasi daya yang rendah.

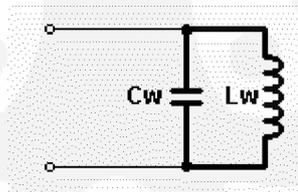
### **2.3.2 Rangkaian Tangki Resonansi Paralel**

Kumparan kerja dibuat untuk beresonansi pada frekuensi operasi dengan kapasitor yang secara paralel. Hal ini menyebabkan arus melalui kumparan kerja menjadi sinusoidal. Resonansi paralel juga memperbesar arus melalui kumparan bekerja, jauh lebih tinggi daripada kemampuan arus keluaran dari inverter sendirian. Inverter mendapat beban sinusoidal saat ini. Namun, dalam hal ini hanya harus membawa bagian dari arus beban yang benar-benar tidak bekerja

nyata. Inverter tidak harus membawa aliran arus penuh pada kumparan kerja. Hal ini sangat penting karena rendahnya faktor daya pada aplikasi pemanas induksi biasanya rendah. Properti ini dari rangkaian resonansi paralel dapat membuat pengurangan berkali lipat dalam arus yang harus didukung oleh inverter dan kabel yang menghubungkannya ke kumparan kerja.

Kerugian konduksi biasanya sebanding dengan kuadrat arus, sehingga pengurangan sepuluh kali lipat dalam arus beban merupakan penghematan yang signifikan dalam kerugian konduksi di inverter dan kabel yang terkait. Ini berarti bahwa kumparan kerja dapat ditempatkan di lokasi yang jauh dari inverter tanpa menimbulkan kerugian besar di kabel.

Kumparan kerja menggunakan teknik ini sering kali hanya terdiri dari beberapa lilitan sebuah konduktor tembaga tebal tetapi dengan arus besar ratusan atau ribuan ampere mengalir. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan arus yang diperlukan untuk melakukan pemanasan induksi. Pendinginan air diperlukan, tetapi tidak untuk sistem pemanas induksi berskala kecil. Sehingga diperlukan untuk membuang kelebihan panas yang dihasilkan oleh bagian dari arus frekuensi tinggi besar yang melalui kumparan kerja dan kapasitor tangki yang terpasang.



Gambar 2.4. Rangkaian tangki resonansi paralel

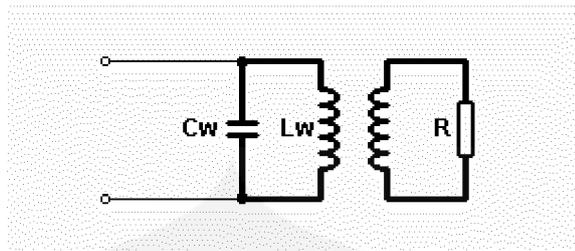
Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian tangki resonansi paralel kumparan kerja dapat dianggap sebagai suatu beban induktif dengan koreksi "faktor daya" (*power factor correction*) kapasitor terhubung di atasnya. Kapasitor *PFC* menyediakan arus reaktif sama dan berlawanan dengan arus induktif yang besar ditarik oleh kumparan kerja. Hal ini perlu diingat bahwa arus besar terlokalisasi ke kumparan kerja dan kapasitor, dan hanya merupakan daya reaktif mengalir berbanding terbalik antara keduanya.

Hanya arus nyata mengalir dari inverter dalam jumlah relatif kecil diperlukan untuk mengatasi kerugian dalam kapasitor PFC dan koil kerja. Terdapat beberapa kerugian dalam rangkaian tangki karena rugi dielektrik dalam kapasitor dan efek kulit menyebabkan kerugian resistif dalam kapasitor dan kumparan kerja. Oleh karena itu, arus yang kecil selalu diambil dari inverter walau tanpa benda kerja. Ketika sebuah benda kerja dimasukkan ke dalam kumparan kerja pada rangkaian resonansi paralel ini menunjukkan kerugian dalam sistem. Sehingga arus yang ditarik oleh rangkaian tangki resonansi paralel meningkat ketika sebuah benda kerja konduktif dimasukkan ke dalam kumparan.

### **2.3.3 Pencocokan Impendansi**

Hal ini mengacu pada elektronik yang berada di antara sumber daya frekuensi tinggi dan kumparan kerja yang kita menggunakan untuk pemanasan. Saat memanaskan sepotong logam padat melalui pemanasan induksi kita perlu arus yang sangat besar mengalir di permukaan logam. Namun hal ini dapat berbeda dengan inverter yang menghasilkan kekuatan frekuensi tinggi. Inverter ini bekerja lebih baik (dan desain agak lebih mudah) jika beroperasi pada tegangan yang cukup tinggi tetapi arus rendah. Masalah yang biasanya dihadapi dalam elektronika daya ketika kita mencoba mengalihkan arus besar dan mematikan dalam waktu sangat singkat) Meningkatkan tegangan dan menurunkan arus yang memungkinkan menggunakan MOSFET atau IGBT. Arus relatif rendah membuat inverter kurang sensitif induktansi yang menyimpang. Ini adalah tugas dari jaringan yang sesuai dan kumparan kerja untuk mengubah tegangan tinggi dengan arus rendah dari inverter ke tegangan rendah dengan arus tinggi diperlukan untuk memanaskan benda kerja secara efisien.

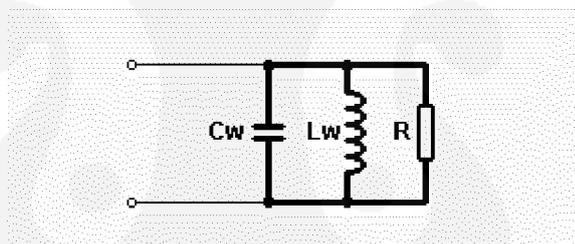
Dengan menggabungkan rangkaian kumparan kerja ( $L_{work}$ ) dan kapasitor kerja ( $C_{work}$ ) sebagai rangkaian tangki resonansi paralel, rangkaian ini memiliki resistansi ( $R$ ) akibat benda kerja yang digabungkan ke dalam kumparan bekerja karena kopling magnetik antara dua konduktor. Lihat gambar 2.5.



Gambar 2.5. Rangkaian tangki resonansi paralel dengan benda kerja terpisah

Dalam prakteknya resistansi dari kumparan kerja, resistansi kapasitor tangki, dan resistansi dari benda kerja menimbulkan kerugian pada rangkaian tangki dan meredam getarannya.

Oleh karena itu dengan menggabungkan semua kerugian akibat resistansi menjadi sebuah kerugian resistansi tunggal. Pada rangkaian resonansi paralel ini muncul kerugian secara langsung dirangkaian tangki. Resistansi ini merupakan satu-satunya komponen yang dapat mengkonsumsi daya nyata, dan karena itu kerugian akibat resistansi sebagai beban dengan mencoba untuk mendorong daya ke dalam suatu cara yang efisien.

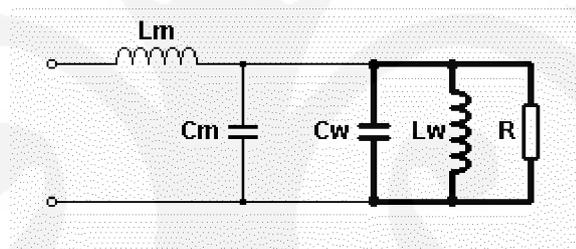


Gambar 2.6. Rangkaian tangki resonansi multi paralel

Ketika resonansi arus yang ditarik oleh kapasitor tangki dan koil kerja sama besarnya dan berlawanan fasa dan karena itu saling meniadakan sumber daya yang diberikan pada rangkaian tersebut. Ini berarti bahwa beban hanya bisa dilihat oleh sumber listrik pada frekuensi resonansi adalah kerugian akibat resistansi rangkaian tangki. Ketika frekuensi resonansi pada sisi lainnya, ada tambahan fasa pada komponen terhadap arus yang disebabkan oleh peniadaan arus pada kumparan kerja dan arus pada kapasitor tangki. arus reaktif secara total meningkatkan besarnya arus yang diambil dari sumber tetapi tidak memberikan kontribusi apapun pemanasan berguna dalam benda kerja.

Tugas jaringan pencocokan hanya untuk mengubah kerugian akibat resistansi yang relatif besar dirangkaian tangki ke nilai yang lebih rendah yang lebih sesuai dengan inverter untuk memperoleh frekuensi resonansi yang sesuai. Ada banyak cara yang berbeda untuk mencapai transformasi impedansi ini termasuk menekan kumparan kerja, menggunakan sebuah transformator ferit, pembagi kapasitif di tempat kapasitor tangki, atau rangkaian pencocokan seperti jaringan  $L_{match}$ .

Dalam jaringan  $L_{match}$  dapat mengubah resistansi beban yang relatif tinggi dari rangkaian tangki sekitar 10 ohm yang sesuai sehingga inverter bekerja dengan baik. Gambar 2.6 memungkinkan inverter untuk menjalankan dari beberapa ratus volt sementara menjaga arus untuk tingkat menengah, MOSFET dapat digunakan untuk melakukan operasi *switching*.



Gambar 2.7. Rangkaian tangki resonansi seri paralel

Jaringan  $L_{match}$  terdiri dari komponen  $L_{match}$  dan  $C_{match}$  terdapat berlawanan. Jaringan  $L_{match}$  memiliki sifat sangat diinginkan beberapa aplikasi ini. Induktor dimasukkan ke jaringan  $L_{match}$  menyajikan reaktansi induktif yang semakin meningkat untuk semua frekuensi yang lebih tinggi daripada frekuensi resonansi dari rangkaian tangki. Hal ini sangat penting ketika kumparan kerja diberi masukan dari inverter sumber tegangan yang menghasilkan keluaran tegangan persegi.

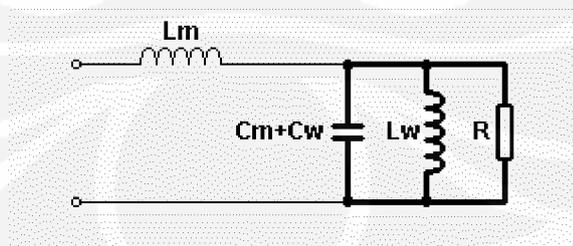
Tegangan persegi yang dihasilkan oleh rangkaian *half-bridge* atau *full-bridge* terdapat dengan harmonisa frekuensi tinggi yang diinginkan frekuensi dasar. Sambungan langsung seperti sumber tegangan ke rangkaian resonansi paralel akan menyebabkan arus berlebihan mengalir terjadi harmonisa dari pengaturan frekuensi. Hal ini dikarenakan tangki kapasitor pada rangkaian

resonansi paralel akan memunculkan reaktansi kapasitif semakin rendah untuk meningkatkan frekuensi. Sehingga berpotensi sangat merusak sebuah sumber tegangan inverter. Ini menghasilkan lonjakan arus besar pada transisi *switching* pada inverter yang dengan cepat mengisi dan membuang muatan pada kapasitor tangki pada puncak gelombang persegi yang naik dan turun. Masuknya jaringan  $L_{match}$  antara inverter dan rangkaian tangki menghilangkan masalah ini. Saat keluaran dari inverter terjadi reaktansi induktif di jaringan  $L_{match}$  pertama, dan semua harmonisa dari pengatur gelombang terjadi impedansi induktif meningkat secara bertahap. Ini berarti bahwa arus maksimum pada frekuensi hanya sedikit arus harmonik, membuat beban inverter yang saat ini menjadi bentuk gelombang eksponensial.

Akhirnya dengan pengaturan yang benar di jaringan  $L_{match}$  mampu memberikan sedikit beban induktif ke inverter. Beban inverter ini sedikit tertinggal saat ini dapat memudahkan *Zero-Voltage-Switching (ZVS)* dari MOSFET di jembatan inverter. Secara signifikan mengurangi kerugian akibat pengaktifan keluaran perangkat kapasitansi pada MOSFET yang dioperasikan pada tegangan tinggi. Hasil keseluruhan adalah sedikit pemanasan dalam semikonduktor sehingga meningkatkan masa pakai.

Dapat disimpulkan, masuknya jaringan  $L_{match}$  antara inverter dan rangkaian tangki resonansi paralel mencakup dua hal, yaitu:

1. Impedansi yang cocok sehingga jumlah daya yang diperlukan dapat disuplai dari inverter ke benda kerja,
2. Memberikan kenaikan reaktansi induktif menjadi harmonisa frekuensi tinggi untuk menjaga inverter aman.



Gambar 2.8. Rangkaian tangki resonansi seri paralel  $L_{match}$  dan  $C_{match}$

Melihat skema sebelumnya, kita dapat melihat bahwa kapasitor di jaringan pencocokan  $C_{match}$  dan kapasitor tangki keduanya secara paralel. Dalam

prakteknya kedua fungsi-fungsi ini biasanya dilakukan oleh fungsi kapasitor daya. Sebagian besar kapasitansi yang dapat dianggap sebagai resonansi paralel dengan kumparan kerja, dengan jumlah kecil memberikan aksi impedansi yang sesuai dengan induktor  $L_{match}$ . Menyisir kedua kapasitansi menjadi satu membawa kita untuk sampai pada model  $LCLR$  untuk pengaturan kumparan kerja, yang umum digunakan dalam industri untuk pemanasan induksi.

#### 2.3.4 Rangkaian Kumparan Kerja $LCLR$

Susunan ini menggabungkan kumparan kerja menjadi rangkaian resonansi paralel dan menggunakan jaringan  $L_{match}$  antara rangkaian tangki dan inverter. Jaringan yang sesuai digunakan untuk membuat rangkaian tangki tampak sebagai beban yang lebih cocok untuk inverter. Kumparan kerja  $LCLR$  memiliki sejumlah keunggulan yang diinginkan:

1. Arus yang besar mengalir pada koil kerja, tetapi inverter hanya memiliki suplai arus rendah. Arus besar yang mengalir terbatas pada kumparan kerja dan kapasitor paralel, yang biasanya terletak sangat dekat satu sama lain.
2. Hanya arus yang relatif rendah sepanjang saluran transmisi dari inverter ke rangkaian tangki, jadi ini dapat menggunakan kabel berukuran kecil sesuai dengan kebutuhan.
3. Setiap induktansi liar dari saluran transmisi hanya menjadi bagian dari jaringan induktansi pencocokan  $L_{match}$ . Oleh karena itu tempat yang panas dapat terletak jauh dari inverter.
4. Pada inverter terjadi arus beban sinusoidal sehingga mendapat keuntungan dari  $ZCS$  atau  $ZVS$  untuk mengurangi kerugian saat pengaktifan sehingga tidak terjadi panas berlebih pada rangkaian inverter.
5. Susunan seri  $L_{match}$  serial ini cocok induktor dapat diubah untuk melayani beban berbeda yang ditempatkan di dalam kumparan kerja.
6. Rangkaian tangki dapat diberi suplai melalui  $L_{match}$  dari inverter untuk mencapai tingkat daya yang dicapai dengan inverter tunggal.  $L_{match}$  pencocokan membagi arus beban yang melekat antara inverter dan juga

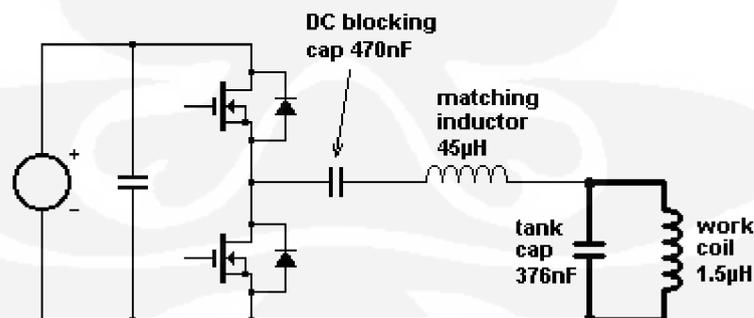
membuat sistem untuk toleransi terhadap beberapa ketidakcocokan pengaktifan singkat dari inverter yang paralel.

Keuntungan lain dari susunan kumparan kerja *LCLR* adalah bahwa hal itu tidak memerlukan sebuah transformator frekuensi tinggi untuk memberikan fungsi impedansi yang sesuai. Transformator ferit mampu menangani beberapa kilowatt, berat dan cukup mahal. Selain itu, trafo harus didinginkan untuk membuang kelebihan panas yang dihasilkan oleh arus tinggi yang mengalir dalam konduktor tersebut.. Penggabungan jaringan  $L_{match}$  ke susunan kumparan kerja *LCLR* menghilangkan keperluan trafo untuk mencocokkan inverter ke kumparan kerja, penghematan biaya dan dapat menyederhanakan desain.

Namun, perancang harus menghargai bahwa mengisolasi transformator 1:1 masih mungkin diperlukan antara inverter dan input ke kumparan kerja *LCLR* jika diperlukan isolasi listrik dari suplai listrik. Hal ini tergantung apakah isolasi adalah penting, dan apakah suplai daya utama dalam pemanas induksi sudah menyediakan isolasi listrik cukup untuk memenuhi persyaratan keselamatan.

### 2.3.5 Konsep Skematik

Sistem pada skematik dibawah ini menunjukkan inverter sederhana yang pengaturan kumparan kerja *LCLR*.



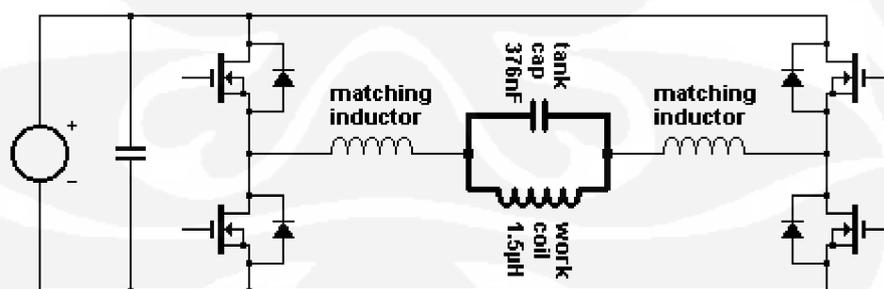
Gambar 2.9. Rangkaian inverter pemanas induksi *Half-Bridge* menggunakan kumparan kerja *LCLR*

Inverter dalam prototip ini mendemonstrasi adalah *half-bridge* sederhana yang terdiri dari dua rangkaian ini disuplai dari suplai DC tanpa kopling kapasitor yang melewati saluran untuk mendukung tuntutan arus AC pada inverter . Namun,

harus disadari bahwa kualitas dan regulasi catu daya untuk induksi pemanas aplikasi ini tidak begitu penting. Gelombang disearahkan dapat bekerja dan pengaturan DC ketika melakukan pemanasan logam, tetapi arus puncak yang lebih tinggi yang sama dengan rata-rata untuk daya pemanas. Ada banyak alasan untuk menjaga ukuran kapasitor DC ke minimum. Secara khusus, meningkatkan faktor daya dari arus diambil dari suplai listrik melalui penyearah, dan juga mengurangi energi jika terjadi kondisi kesalahan pada inverter.

*DC blocking* kapasitor digunakan hanya untuk menghentikan kekuaran DC dari inverter setengah jembatan dari menyebabkan arus melalui kumparan kerja. Ukuran cukup besar yang tidak mengambil bagian dalam pencocokan impedansi  $L_{match}$ , dan tidak merugikan pengaruh pengoperasian susunan kumparan kerja *LCLR*.

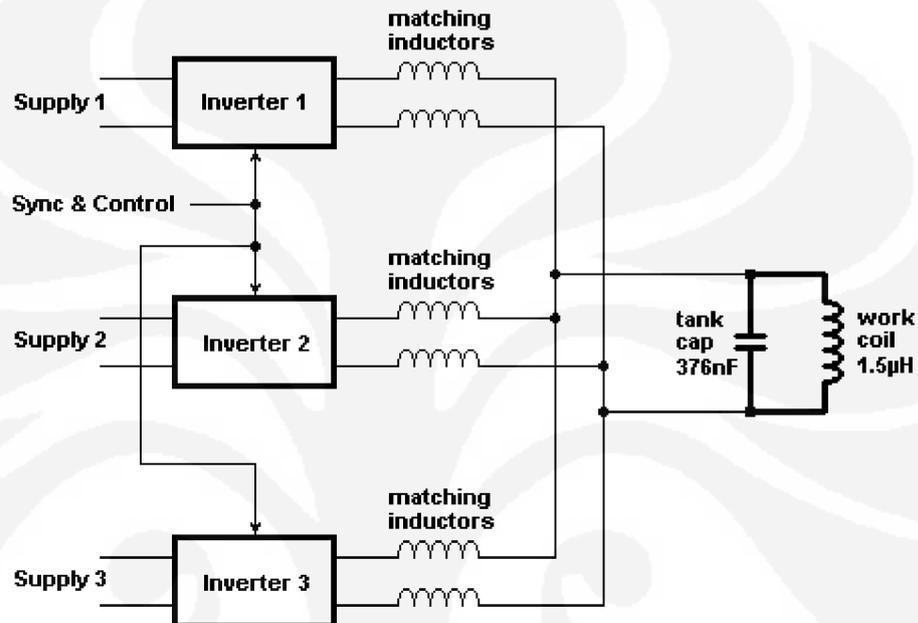
Desain pada daya tinggi adalah umum untuk menggunakan *full-bridge* (jembatan-H) dari 4 atau lebih pengaktifan. Dalam desain  $L_{match}$  biasanya membagi sama antara kedua kaki jembatan sehingga bentuk gelombang tegangan yang diatur seimbang terhadap tanah. *DC-blocking* kapasitor juga dapat dihilangkan jika kontrol arus digunakan untuk memastikan bahwa tidak ada arus DC antara kaki jembatan. Jika kedua kaki jembatan-H dapat dikontrol secara independen maka ada ruang untuk mengendalikan daya menggunakan kontrol penggeser fasa (*fase-shift*).



Gambar 2.10. Pemanas induksi *Full-Bridge* menggunakan kumparan kerja *LCLR*

Pada perangkat pemanas induksi yang memiliki daya tinggi memungkinkan untuk menggunakan beberapa inverter secara terpisah efektif terhubung secara paralel untuk memenuhi tuntutan arus beban tinggi. Namun,

inverter yang terpisah tidak langsung terikat secara paralel pada terminal keluaran pada jembatan-H. Pada gambar 2.8 diperlihatkan setiap inverter didistribusikan yang dihubungkan ke kumparan kerja melalui pasangan  $L_{match}$  yang memastikan bahwa total beban tersebar merata di antara semua inverter.



Gambar 2.11. Pemanas induksi *LCLR* menggunakan distribusi multi inverter

Induktor  $L_{match}$  ini juga menyediakan sejumlah manfaat tambahan ketika inverter yang paralel dengan cara ini. Perhatikan gambar 2.9.

Pertama, impedansi antara dua keluaran inverter adalah sama dengan dua kali nilai induktansi yang cocok. Impedansi induktif ini membatasi kegagalan arus yang mengalir antara inverter paralel jika pengaktifan sesaat tidak sempurna disinkronisasi.

Kedua, ini reaktansi induktif sama antara batas inverter di mana kesalahan arus meningkat jika salah satu perangkat inverter tidak bekerja, dapat berpotensi menghilangkan kegagalan perangkat lainnya.

Akhirnya, karena semua inverter didistribusikan sudah terhubung melalui induktor, induktansi tambahan apapun antara inverter hanya menambah impedansi ini dan hanya memiliki pengaruh sedikit. Oleh karena itu inverter didistribusikan untuk pemanasan induksi tidak harus secara fisik berada dekat satu sama lain. Jika

transformator isolasi termasuk dalam desain maka mereka tidak perlu bekerja dari suplai daya yang sama.

### 2.3.6 Toleransi Kesalahan

Pengaturan kumparan kerja *LCLR* bekerja dengan baik di bawah berbagai kondisi gangguan yang mungkin terjadi, diantaranya sebagai berikut:

1. Rangkaian terbuka kumparan kerja.
2. *Short circuit* pada kumparan kerja, (atau tangki kapasitor.)
3. *Shorted turn* pada kumparan kerja.
4. Rangkaian terbuka tangki kapasitor.

Semua kegagalan ini mengakibatkan peningkatan impedansi yang ada untuk inverter dan oleh karena itu penurunan terkait dalam arus yang ditarik dari inverter. Hal terburuk yang bisa terjadi adalah bahwa rangkaian tangki berubah menjadi frekuensi resonansi alami adalah tepat di atas frekuensi operasi inverter. Karena frekuensi drive masih dekat dengan resonansi masih ada arus yang signifikan dari inverter. Tapi faktor daya berkurang karena harmonisa, dan arus beban inverter lebih dulu dari tegangan. Situasi ini tidak diinginkan karena arus beban dilihat oleh inverter arah perubahan sebelum perubahan tegangan yang diberikan. Hasil ini adalah yang saat ini komutasi gaya antara dioda dan MOSFET berbanding terbalik setiap kali diaktifkan. Hal ini menyebabkan pemulihan reverse paksa dioda sementara sudah membawa maju yang arus yang signifikan. Sehingga menyebabkan gelombang arus besar melalui dioda baik dan MOSFET berbanding terbalik saat pengaktifan.

Meskipun bukan masalah bagi rectifier pemulihan sistem yang cepat khusus, pemulihan ini dipaksa dapat menyebabkan masalah jika tubuh intrinsik MOSFET dioda digunakan untuk menyediakan fungsi dioda *fly-wheel*. Lonjakan arus yang besar merupakan kerugian daya yang signifikan dan ancaman terhadap kehandalan dari rangkaian tersebut. Namun, harus disadari bahwa kontrol yang tepat dari operasi frekuensi inverter harus memastikan bahwa alur frekuensi resonansi dari rangkaian tangki. Oleh karena itu kondisi faktor daya idealnya tidak muncul, dan seharusnya tidak bertahan untuk waktu yang lama. Frekuensi

resonansi dibatasi sehingga sistem akan berhenti jika frekuensi yang diterima di luar operasi kerja.

### **2.3.7 Metode Kontrol Daya**

Kontrol daya untuk mengontrol jumlah daya yang dibutuhkan proses pemanasan induksi. Hal ini menentukan tingkat di mana energi panas dipindahkan ke benda kerja. Pengaturan daya dari jenis pemanas induksi dapat dikendalikan dalam sejumlah cara yang berbeda:

#### **2.3.7.1 Memvariasikan tegangan DC.**

Kekuatan diproses oleh inverter dapat diturunkan dengan mengurangi suplai tegangan ke inverter. Hal ini dapat dicapai dengan menjalankan inverter dari suplai tegangan DC variabel seperti penyearah terkendali menggunakan thyristor untuk memvariasikan tegangan suplai DC yang berasal dari pasokan listrik. impedansi yang muncul pada inverter sebagian besar konstan dengan tingkat daya yang berbeda-beda, sehingga throughput kekuatan inverter kira-kira sebanding dengan kuadrat tegangan suplai. Link Memvariasikan tegangan DC memungkinkan kontrol daya penuh dari 0% hingga 100%.

Daya yang keluar dalam jumlah kilowatt tidak hanya bergantung pada suplai tegangan DC pada inverter, tetapi juga juga impedansi beban pada kumparan kerja yang ada pada inverter melalui jaringan yang sesuai. Oleh karena itu jika diperlukan kontrol daya yang tepat pada saat pemanasan induksi daya harus diukur dengan baik, dibutuhkan operator untuk membandingkan pengaturan daya terhadap sinyal kesalahan yang diumpan balik untuk terus menyesuaikan tegangan DC link dengan cara loop tertutup untuk meminimalkan kesalahan. Hal ini diperlukan untuk mempertahankan daya konstan karena resistansi dari perubahan panas pada benda kerja.

#### **2.3.7.2 Memvariasikan rasio *duty cycle* pada inverter.**

Daya yang diproses oleh inverter dapat dikurangi dengan mengurangi waktu aktif dari saklar di inverter. Power hanya berasal pada kumparan kerja saat diaktifkan. Arus beban mengalir melalui tubuh perangkat dioda selama deadtime

ketika kedua perangkat dimatikan. Memvariasikan rasio tugas dari saklar memungkinkan kontrol daya penuh dari 0% sampai 100%.

Namun, kelemahan signifikan dari metode ini adalah pergantian arus besar antara perangkat aktif dan dioda. Sehingga memaksa pemulihan dioda terjadi jika rasio bertugas jauh berkurang. Untuk alasan ini kontrol rasio tugas biasanya tidak digunakan pada inverter pemanas induksi dengan daya tinggi.

### **2.3.7.3 Memvariasikan frekuensi operasi pada inverter.**

Daya yang diberikan oleh inverter ke kumparan kerja dapat dikurangi dengan mengontrol inverter dari frekuensi resonansi alami dari rangkaian tangki dengan menggabungkan kumparan kerja. Frekuensi operasi dari inverter tersebut akan dipindahkan jauh dari frekuensi resonansi rangkaian tangki, ada sedikit kenaikan resonansi pada rangkaian tangki, dan arus pada kumparan kerja berkurang. Oleh karena itu sedikit arus yang mengalir diinduksi ke benda kerja dan pengaruh pemanasan berkurang.

Dalam hal mengurangi daya inverter harus mengatur ulang disisi tinggi rangkaian tangki frekuensi resonansi alami. Hal ini menyebabkan reaktansi induktif pada masukan dari rangkaian pencocokan untuk menjadi semakin dominan dengan meningkatnya frekuensi. Oleh karena itu arus yang ditarik dari inverter dengan jaringan pencocokan mulai mendahului dalam fasa dan amplitudo berkurang. Kedua faktor ini memberikan kontribusi terhadap penurunan daya yang sesungguhnya. Jika arus mendahului faktor daya memastikan bahwa perangkat dalam inverter masih menyala dengan tegangan nol (*zero voltage*) yang melewatinya, dan tidak ada masalah pemulihan dioda. Hal ini dapat dibedakan dengan situasi yang akan terjadi jika inverter itu diatur di sisi rendah frekuensi resonansi kumparan kerja. *ZVS* hilang, dan arus dipaksa mundur sementara dioda melakukan pemulihan untuk kemudian membawa arus beban yang signifikan.

Metode pengendalian tingkat daya oleh perangkat pengendali cukup sederhana karena pemanas induksi sudah memiliki kendali atas frekuensi operasi inverter untuk melayani benda kerja yang berbeda dan kumparan kerja. Sisi bawah hanya menyediakan jenis layanan kontrol terbatas, karena ada batas berapa cepat semikonduktor daya dapat dibuat untuk pengaktifkan. Hal ini terutama

berlaku pada aplikasi daya tinggi di mana perangkat mungkin sudah berjalan mendekati kecepatan switching maksimum.

Sistem daya tinggi menggunakan metode kontrol daya memerlukan detail analisis termal hasil atas kerugian akibat *switching* pada tingkat daya yang berbeda untuk memastikan suhu perangkat selalu tetap berada dalam batas toleransi.

#### **2.3.7.4 Memvariasikan nilai dari induktor di jaringan yang sesuai.**

Suplai daya yang diberikan oleh inverter ke kumparan kerja dapat bervariasi dengan mengubah nilai komponen jaringan yang sesuai. Jaringan  $L_{match}$  antara inverter dan rangkaian tangki terdiri dari bagian induktif dan kapasitif. Tapi bagian kapasitif adalah kapasitor paralel dengan tangki kumparan kerja, dan dalam praktek biasanya saling terhubung. Oleh karena itu satu-satunya bagian dari jaringan pencocokan yang tersedia untuk menyesuaikan adalah induktor.

Jaringan pencocokan bertanggung jawab untuk mengubah impedansi beban kumparan kerja ke impedansi beban yang sesuai untuk didorong oleh inverter. Mengubah induktansi dari induktor  $L_{match}$  menyesuaikan nilai yang impedansi beban yang sesuai. Secara umum, mengurangi induktansi dari induktor pencocokan  $L_{match}$  menyebabkan impedansi kumparan kerja yang akan berubah ke impedansi rendah. Impedansi beban ini lebih rendah yang muncul pada inverter menyebabkan lebih banyak daya berasal dari inverter. Sebaliknya, meningkatkan induktansi dari induktor  $L_{match}$  menyebabkan impedansi beban yang lebih tinggi yang akan muncul pada inverter. Hasilnya, beban menjadi lebih ringan dalam aliran daya rendah dari inverter ke kumparan bekerja.

Tingkat kontrol daya dapat direalisasikan dengan mengubah induktor  $L_{match}$  yang sesuai. Ada juga pergeseran pada frekuensi resonansi sistem secara keseluruhan, ini adalah harga yang harus dibayar untuk menggabungkan kapasitansi  $L_{match}$  dan kapasitansi tangki ke dalam satu unit.

Jaringan  $L_{match}$  dasarnya meminjam beberapa kapasitansi dari kapasitor tangki untuk melakukan operasi yang sesuai, sehingga membuat rangkaian tangki untuk beresonansi pada frekuensi yang lebih tinggi. Untuk alasan ini induktor  $L_{match}$  biasanya tetap atau disesuaikan benda kerja dimaksudkan untuk menjadi

panas, daripada menyediakan pengguna dengan pengaturan daya sepenuhnya dikontrol.

#### **2.3.7.5 Transformator pencocokan impedansi.**

Suplai daya diberikan oleh inverter ke kumparan kerja dapat bervariasi dalam menggunakan sebuah transformator daya  $RF$  untuk melakukan konversi impedansi. Meskipun sebagian besar manfaat pengaturan  $LCLR$  adalah penghapusan sebuah transformator daya ferit yang besar dan mahal, dapat memenuhi perubahan besar dalam parameter sistem dengan cara yang tidak tergantung terhadap frekuensi. Transformator daya ferit juga dapat memberikan isolasi listrik serta melakukan tugas transformasi impedansi untuk mengatur keluaran daya.

Selain itu jika transformator daya ferit ditempatkan di antara keluaran inverter dan masukan ke rangkaian  $L_{match}$  dapat desain dalam banyak cara. Pertama, lokasi transformator dalam posisi ini berarti bahwa impedansi pada kedua gulungan relatif tinggi, yaitu tegangan tinggi dan arus yang relatif kecil. Hal ini lebih mudah untuk merancang transformator daya ferit konvensional untuk kondisi ini. Arus besar yang mengalir pada kumparan kerja terus keluar dari trafo ferit sangat mengurangi masalah pendinginan.

Kedua, meskipun pada trafo keluaran tegangan adalah gelombang persegi dari inverter, gulungan itu membawa arus yang sinusoidal. Kurangnya harmonisa frekuensi tinggi mengurangi pemanasan di trafo akibat efek kulit dan efek kedekatan dalam konduktor.

Akhirnya desain transformator harus dioptimalkan untuk kapasitansi minimum antar gulungan dan isolasi yang baik menyebabkan kebocoran induktansi meningkat. Alasan ini bahwa setiap kebocoran induktansi yang ditunjukkan oleh sebuah transformator terletak yang diposisi ini hanya menambah induktansi yang cocok di masukan ke rangkaian  $L_{match}$ . Oleh karena itu kebocoran induktansi di trafo tersebut tidak merusak kinerja kapasitansi antar gulungan.

#### **2.3.7.6 Kontrol penggeser fasa *phase-shift* pada *H-bridge*.**

Ketika kumparan kerja didorong oleh inverter terhadap masukan tegangan jembatan H (H-bridge) masih ada metode lain untuk mencapai kontrol daya. Jika pengaktifan sesaat di kedua kaki jembatan dapat dikontrol secara independen maka kemungkinan mengendalikan daya yang jatuh dengan menyesuaikan pergeseran fasa antara dua kaki jembatan.

Ketika kedua kaki jembatan beralih fasa, keluaran tegangan yang sama adalah sama besar. Ini berarti tidak ada tegangan pada susunan kumparan kerja dan tidak ada arus mengalir melalui kumparan kerja. Sebaliknya, ketika kedua kaki jembatan mengaktifkan anti-fase arus maksimum mengalir melalui koil kerja dan pemanasan maksimal tercapai. Tingkat daya antara 0% dan 100% dapat dicapai dengan memvariasikan pergeseran fasa dari drive ke setengah jembatan antara 0 derajat dan 180 derajat ketika dibandingkan dengan drive dari kaki jembatan lainnya.

Teknik ini sangat efektif sebagai kontrol daya dapat dicapai disisi rendah kontrol daya. Inverter menjaga faktor daya dengan baik karena inverter tidak dipengaruhi oleh frekuensi resonansi kumparan kerja, sehingga arus reaktif melalui dioda diminimalkan.

#### **2.3.7.7 Kapasitor pemanasan induksi.**

Persyaratan untuk kapasitor digunakan pada pemanasan induksi daya tinggi adalah kebutuhan dari setiap jenis kapasitor. Kapasitor bank yang digunakan pada rangkaian tangki pemanas induksi harus membawa arus penuh yang mengalir pada kumparan kerja untuk waktu yang lama. Arus ini biasanya ratusan ampere pada puluhan atau ratusan kilohertz. Mereka juga terkena pembalikan 100% tegangan di frekuensi yang sama dan bekerja dengan tegangan penuh yang dibangkitkan pada kumparan kerja. Frekuensi operasi tinggi menyebabkan kerugian yang signifikan akibat pemanasan dielektrik dan karena efek kulit pada konduktor. Akhirnya induktansi liar harus bernilai rendah sehingga kapasitor muncul sebagai elemen rangkaian terpusat dibandingkan dengan induktansi yang cukup rendah dari kumparan kerja yang saling terhubung.

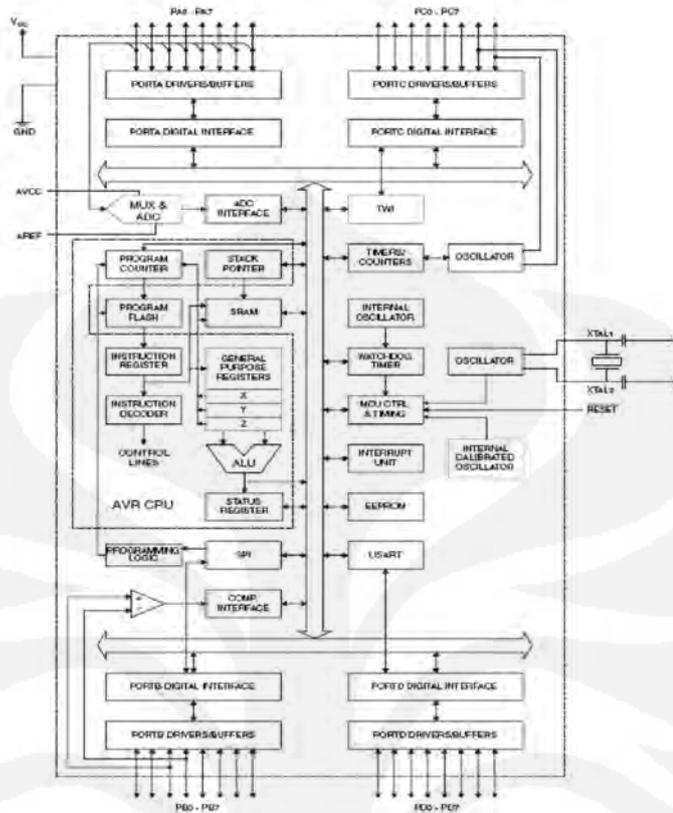
Pilihan yang tepat dielektrik dan teknik konstruksi memperlebar foil digunakan untuk memperkecil jumlah panas yang dihasilkan dan tetap efektif untuk induktansi seri. Namun, bahkan dengan teknik-teknik induksi pemanas kapasitor masih memperlihatkan disipasi daya yang signifikan karena arus RF besar mereka harus membawa. Oleh karena itu faktor penting dalam desain adalah menghilangkan panas dari dalam kapasitor untuk memperpanjang masa pakai dielektrik.

## **2.4 MIKROKONTROLER ATMEL AT mega 16**

Mikrokontroler CMOS 6-bit daya-rendah berbasis arsitektur RISC yang ditingkatkan. Kebanyakan instruksi dikerjakan pada satu siklus clock, mikrokontroler mempunyai *throughput* mendekati 16 MIPS per MHz membuat desain sistem untuk mengoptimasi konsumsi daya versus kecepatan proses.

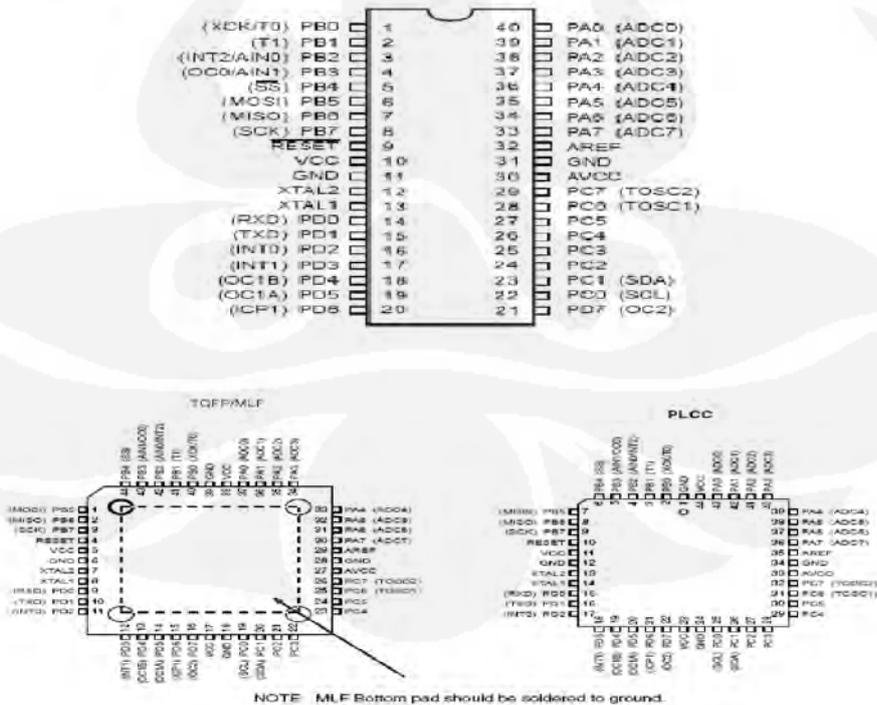
### **2.4.1 Blok Diagram**

Inti dari mikrokontroler adalah dengan menyatukan beberapa instruksi dengan 32 register kerja serbaguna. Ke-32 register kerja serbaguna terhubung langsung dengan ALU, hal tersebut memungkinkan 2 buah register mandiri diakses dengan sebuah instruksi dalam satu siklus *clock*.



Gambar 2.12. Blok Diagram Atmega16

### 2.4.2 Konfigurasi Pin



Gambar 2.13. Mikrokontroler kemasan 40-pin

#### Konfigurasi pin :

- Vcc (pin 10)

Tegangan *supply* sebesar 4,5 – 5,5 Vdc

GND / *ground* (pin 31)

- Port A (PA7 s/d PA0)

Port A berlaku sebagai *input* analog untuk ADC. Port A juga berlaku sebagai port *input-output* ( I/O ) 8 bit *bi-directional*, jika AC tidak digunakan. Pin port menyediakan resistor *pull-up internal* . *Output* buffer port A memiliki karakteristik kendali simetris di kedua kemampuan *sink* dan *source*. Ketika pin PA0 s/d PA7 digunakan sebagai *input* dan ditarik rendah dari luar, maka akan menjadi sumber arus jika resistor *pull-up internal* diaktifkan. Pin port A adalah *tri-state* ketika kondisi *reset* aktif, bahkan ketika *clock* tidak bekerja.

- Port B (PB7 s/d PB0)

Port B juga berlaku sebagai port *input-output* ( I/O ) 8 bit *bi-directional* dengan resistor *pull-up internal* . *Output* buffer port B memiliki karakteristik kendali simetris di kedua kemampuan *sink* dan *source*. Ketika pin PB0 s/d PB7 digunakan sebagai *input* dan ditarik rendah dari luar, maka akan menjadi sumber arus jika resistor *pull-up internal* diaktifkan. Pin port B adalah *tri-state* ketika kondisi *reset* aktif, bahkan ketika *clock* tidak bekerja.

- Port C (PC7 s/d PC0)

Port C juga berlaku sebagai port *input-output* ( I/O ) 8 bit *bi-directional* dengan resistor *pull-up internal* . *Output* buffer port C memiliki karakteristik kendali simetris di kedua kemampuan *sink* dan *source*. Ketika pin PC0 s/d PC7 digunakan sebagai *input* dan ditarik rendah dari luar, maka akan menjadi sumber arus jika resistor *pull-up internal* diaktifkan. Pin port C adalah *tri-state* ketika kondisi *reset* aktif, bahkan ketika *clock* tidak bekerja.

- Port D (PD7 s/d PD0)

Port D juga berlaku sebagai port *input-output* ( I/O ) 8 bit bi-directional dengan resistor *pull-up internal* . *Output* buffer port D memiliki karakteristik kendali simetris di kedua kemampuan *sink* dan *source*. Ketika pin PD0 s/d PD7 digunakan sebagai *input* dan ditarik rendah dari luar, maka akan menjadi sumber arus jika resistor *pull-up internal* diaktifkan. Pin port D adalah *tri-state* ketika kondisi *reset* aktif, bahkan ketika *clock* tidak bekerja.

- RESET

*Input reset*. Level rendah pada pin ini dengan panjang lebih dari panjang pulsa minimum akan membangkitkan *reset*, bahkan ketika *clock* sedang bekerja.

- XTAL1

XTAL1 adalah *input* ke penguat osilator *inverting* dan *input* ke rangkaian operasi *clock internal* .

- XTAL2

XTAL2 adalah *output* dari penguat osilator *inverting*.

- AVCC

AVCC adalah pin tegangan supply untuk port A dan ADC. Harus dihubungkan ke VCC walaupun jika ADC tidak digunakan. Jika ADC digunakan harus dihubungkan ke VCC melalui sebuah *low-pass filter*.

- AREF

AREF adalah pin referensi analog untuk ADC.

### 2.4.3 Memori Mikrokontroler

Arsitektur mikrokontroler memiliki dua ruang memori utama yaitu memori data dan memori program. Juga memiliki memori EEPROM untuk penyimpanan data. Ketiga jenis ruang memori ini bersifat linier dan regular.

### 2.4.3.1 Memori Program Flash

Mikrokontroler memiliki *In-System reprogrammable flash memory* untuk penyimpanan program. Karena instruksi memiliki lebar 16 atau 32 bit, maka flash diatur sebagai 4K x 16. Untuk keamanan software memori program flash dibagi kedalam dua bagian yaitu bagian boot program dan bagian program aplikasi.

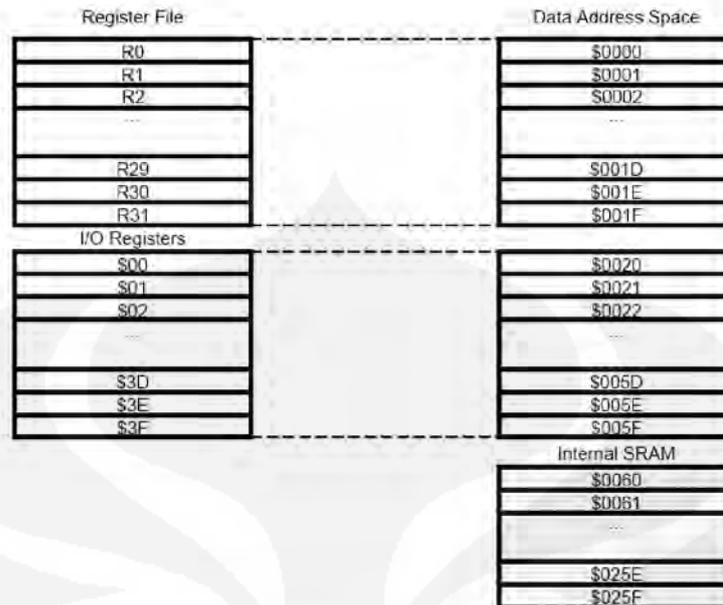
Memori flash memiliki ketahanan sampai 10.000 kali tulis/hapus. Program Counter (PC) memiliki lebar 12 bit untuk mengamati sampai 4K lokasi memori program. Gambar 2.12 memperlihatkan peta memori program.



Gambar 2.14. Peta memori program

### 2.4.3.2 Memori Data SRAM

Gambar 2.12 menunjukkan bagaimana memori SRAM diatur. 608 lokasi memori data mengamati register *file*, memori I/O, dan data internal SRAM. 69 lokasi pertama mengamati register *file* dan memori I/O dan 512 berikutnya mengamati data internal SRAM.



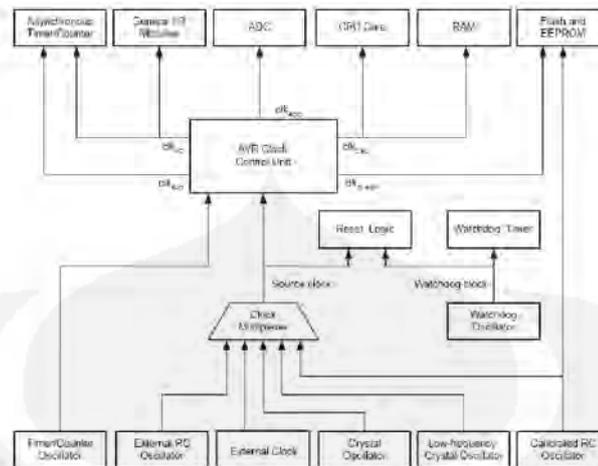
Gambar 2.15. Peta memori data

#### 2.4.3.3 Memori Data EEPROM

Mikrokontroler memiliki 512 byte memori data EEPROM. Diatur sebagai ruang data terpisah, dimana setiap byte tunggal dapat dibaca dan ditulisi. EEPROM memiliki ketahanan paling tidak sampai 100.000 siklus baca/hapus. Gambar 2.12 menunjukkan peta alamat memori data EEPROM.

#### 2.4.4 Sistem Clock dan Pilihan Clock

Gambar 2.13 menunjukkan prinsip sistem clock dan distribusinya. Seluruh clock tidak harus aktif pada suatu waktu. Untuk mengurangi konsumsi daya maka clock untuk modul yang tidak dipakai dapat dihentikan menggunakan mode *sleep* yang berbeda.



Gambar 2.14. Distribusi Clock

- **CPU Clock- $clk_{CPU}$**

Clock CPU dihubungkan ke bagian dari sistem yang berhubungan dengan operasi inti. Contoh dari modul tersebut adalah *General Purpose Register File*, Register Status dan memori data yang menyimpan Stack Pointer (SP). Mematikan clock CPU akan menghentikan operasi umum dan perhitungan.

- **I/O Clock –  $clk_{I/O}$**

Clock I/O digunakan oleh kebanyakan modul I/O seperti Timer/Counter, SPI dan USART. Clock I/O juga digunakan oleh modul interrupt, akan tetapi beberapa interrupt eksternal dideteksi oleh *logic asynchronous* sehingga interrupt seperti ini akan tetap terdeteksi meskipun I/O dimatikan.

- **Flash Clock- $clk_{FLASH}$**

Clock flash mengontrol operasi dari antar muka flash. Clock flash biasanya aktif bersamaan dengan clock CPU.

- **Asynchronous Timer Clock –  $clk_{ASY}$**

Clock Timer/Counter *Asynchronous* menjadikan Timer/Counter *Asynchronous* dapat langsung dari crystal clock eksternal 32 KHz. Clock tersebut diperuntukan agar Timer/Counter ini dapat dijadikan sebagai *real-time counter* meskipun piranti sedang dalam mode *sleep*.

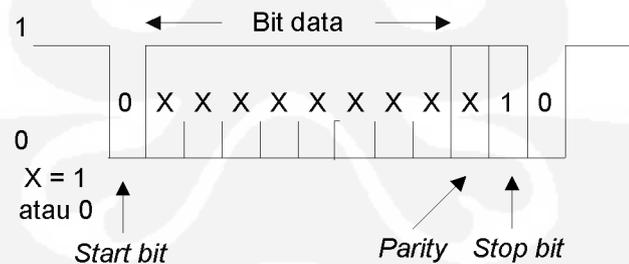
- **ADC Clock- $\text{clk}_{\text{ADC}}$**

Clock ini khusus diberikan untuk ADC. Hal ini memungkinkan menghentikan clock CPU dan I/O untuk mengurangi noise yang dihasilkan oleh rangkaian digital. Hal ini akan memberikan hasil konversi yang lebih akurat.

### 2.4.5 Komunikasi Serial

Pengiriman data digital dari suatu perangkat ke perangkat lain dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satu bentuk pengiriman data adalah pengiriman secara serial. Pada pengiriman data secara serial data dikirim bit demi bit. Pengiriman data seri biasanya dilakukan untuk pengiriman data yang memiliki jarak cukup jauh.

Pengiriman data serial dapat dilakukan dengan dua cara yaitu pengiriman data seri tak sinkron dan pengiriman data seri sinkron. Pada pengiriman data seri tak sinkron setiap karakter dikirim sebagai satu kesatuan. Detak penerima dibangkitkan secara lokal di dalam penerima dan tetap dijaga agar sesuai dengan detak pengirim yang menggunakan bit awal (start bit) dan bit akhir (stop bit) yang dikirim dengan setiap karakter. Bentuk gelombang yang menggunakan penyesuaian awal dan akhir dapat dilihat pada gambar 2.14



Gambar 2.17. Data seri tak sinkron

### 2.4.6 Perangkat Komunikasi serial

Pengiriman data seri antara suatu perangkat ke perangkat lainnya haruslah memenuhi standar pengiriman data. Standar ini sangat diperlukan agar perangkat-perangkat tersebut dapat bekerja satu sama lainnya sehingga kompatibilitas dapat diperoleh. Standar pengiriman data yang diterbitkan oleh EIA (*Electronic*

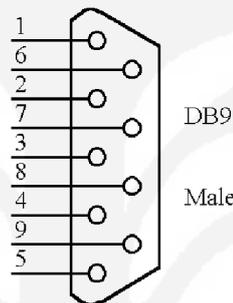
*Industry Association*) diantaranya standard EIA RS232, standard EIA RS422/485 dan standar EIA RS423. Tabel 2.3 memperlihatkan karakteristik dari standar-standar tersebut.

Tabel 2.1. Karakteristik standar EIA

Spesifikasi	RS232	RS423	RS422	RS485
<b>Mode of operation</b>	Single-ended	Single-ended	Diferential	Diferential
<b>Total Number driver and receiver</b>	1 Driver 1 Receiver	1 Driver 10 Receiver	1 Driver 10 Receiver	32 Driver 32 Receiver
<b>Maximum cable length</b>	50FT	4000FT	4000FT	4000FT
<b>Maximum Data Rate</b>	20kb/s	100kb/s	10Mb/s- 100kb/s	10Mb/s- 100kb/s
<b>Max. Driver output voltage</b>	+/-25V	+/-6V	-0.25V - +6V	-7V to 12V
<b>Driver output signal</b>	+/-5V to +/-15V	+/-3.6V	+/-2.0V	+/-1.5V
<b>Driver output signal</b>	+/-25V	+/-6V	+/-6V	+/-6V
<b>Driver load Impedance</b>	3k to 7k	>=450	100	54
<b>Max. Driver Current in High Z state</b>	N/A	N/A	N/A	+/-100uA
<b>Max. Driver Current in High Z state</b>	+/-6mA @ +/- 2V	+/-100uA	+/-100uA	+/-100uA
<b>Slew rate</b>	30V/Us	Adjustable	N/A	N/A
<b>Receive input voltage range</b>	+/-15V	+/-12V	-10V to +10V	-7V to +12V
<b>Receive input sensitivity</b>	+/-3V	+/-200mV	+/-200mV	+/-200Mv
<b>Receive input resistance</b>	3k to 7k	4k min.	4k min.	>=12k

### 2.4.7 Port serial PC

Port Serial atau yang biasa disebut dengan COM merupakan port pada PC yang memungkinkan PC untuk berkomunikasi dengan perangkat luar secara seri. Pengalamatan dari port serial ini adalah 3F8h untuk COM1 dan 2F8h untuk COM2. Standar pengiriman data pada port serial komputer ini merujuk kepada standar EIA 232. Adapun karakteristik dari port serial ini dapat dilihat pada tabel 2.2 dan gambar 2.15



Gambar 2.18. Pin DB9

Tabel 2.2. Karakteristik port serial komputer

Pin pada DB9	Singkatan	Nama Lengkap
3	TD	Transmit data
2	RD	Receive data
7	RTS	Request to Send
8	CTS	Clear to send
6	DSR	Data Set Ready
5	SG	Signal Ground
1	DCD	Data Carrier Detect
4	DTR	Data Terminal Ready
9	RI	Ring Indikator

#### 2.4.8 Komunikasi serial pada mikrokontroller

Mikrokontroller telah dilengkapi dengan perangkat komunikasi serial. Untuk mengaktifkan dan mengkonfigurasi perangkat komunikasi tersebut, pemogram harus mengakses register SCON dan bit SMOD (bit ke 7 pada register PCON).

Perangkat komunikasi serial pada Mikrokontroller dapat dioperasikan dalam 4 mode:

Keempat macam mode kerja tersebut adalah :

- **Mode 0** – bekerja sebagai sarana komunikasi data seri sinkron, data seri dikirim dan diterima melalui kaki **RxD**, sedangkan kaki **TxD** dipakai untuk menyalurkan clock yang diperlukan komunikasi data sinkron. Data ditransmisikan per 8 bit dengan kecepatan transmisi data (Baud rate) tetap, sebesar 1/12 frekuensi kerja.
- **Mode 1** – mode ini dan 2 mode berikutnya merupakan sarana komunikasi seri asinkron. Data seri dikirim melalui kaki **TxD**, dan diterima dari kaki **RxD**. Data ditransmisikan per 10 bit, terdiri atas 1 bit **Start** ('0'), 8 bit **data** dan 1 bit **stop** ('1'). Kecepatan transmisi data (Baud Rate) ditentukan lewat Timer 1, bisa diatur untuk berbagai kecepatan.
- **Mode 2** - Data seri dikirim melalui kaki **TxD**, dan diterima dari kaki **RxD**. Data ditransmisikan per 11 bit, terdiri atas 1 bit **Start** ('0'), 8 bit **data**, 1 bit **data tambahan** (bit ke 9) dan 1 bit **stop** ('1'). Kecepatan transmisi data (Baud Rate) hanya bisa dipilih 1/32 atau 1/64 frekuensi kerja dari.
- **Mode 3** - Data seri dikirim melalui kaki **TxD**, dan diterima dari kaki **RxD**. Data ditransmisikan per 11 bit, terdiri atas 1 bit **Start** ('0'), 8 bit **data**, 1 bit **data tambahan** (bit ke 9) dan 1 bit **stop** ('1'). Sesungguhnya Mode 2 dan 3 sama persis, perbedaannya adalah kecepatan transmisi data (Baud Rate) mode 3 ditentukan lewat Timer 1, bisa diatur untuk berbagai kecepatan, persis sama dengan mode 1.

#### 2.4.9 Kecepatan transmisi

Kecepatan transmisi (Baud Rate) merupakan suatu hal yang amat penting dalam komunikasi data seri asinkron, mengingat dalam komunikasi data seri asinkron clock tidak ikut dikirimkan, sehingga harus diusahakan bahwa kecepatan transmisi mengikuti standard yang sudah ada.

Pada PC kecepatan tranmisi pengiriman data ini dapat dilakukan dengan mengatur kecepatan transmisi ini dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Pengaturan kecepatan transmisi ini dapat dilakukan secara *software*.

### 2.5 SENSOR TEMPERATUR LM35

#### 2.5.1 Prinsip Kerja LM35

LM35 adalah sebuah sensor temperatur *centigrade* presisi, yang memiliki tegangan output analog. Memiliki jangkauan pengukuran  $-55^{\circ}\text{C}$  hingga  $+150^{\circ}\text{C}$  dengan akurasi  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Tegangan output adalah  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ . Tegangan output dapat langsung dihubungkan dengan salah satu port mikrokontroler yang memiliki kemampuan ADC, misalnya ATmega 16.



Gambar 2.19. IC LM35

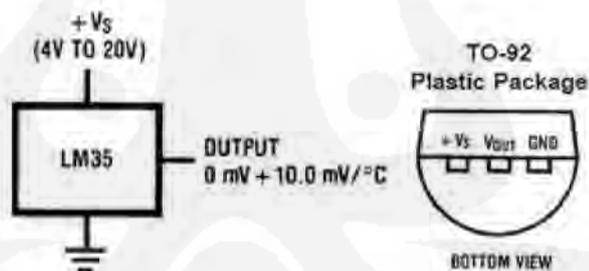
ADC pada ATmega 16 memiliki resolusi 10-bit, yang dapat memberikan keluaran  $2^{10} = 1024$  nilai diskrit. Bila digunakan catu  $5\text{V}$ , resolusi yang dihasilkan adalah  $5000\text{mV}/1024 = 4.8\text{mV}$ . Karena LM35 memiliki resolusi keluaran tegangan  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , maka resolusi termometer yang dibuat dengan ATmega 16 adalah  $10\text{mV}/4.8\text{mV} \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ .

Tabel 2.3. Varian LM35

Varian	Jangkauan
LM35, LM35A	-55°C hingga +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C hingga +110°C
LM35D	0°C hingga +100°C

Salah satu sensor IC temperatur yang sangat populer adalah LM35 yang bentuknya mirip transistor. berikut karakteristiknya:

- Kalibrasi dalam satuan derajat Celsius.
- Linearitas +10mV/°C.
- Akurasi 0,5°C pada temperature ruang.
- Range +2°C - 150°C.
- Dapat dioperasikan pada catu daya 4V – 30V.
- Arus yan mengalir kurang dari 60  $\mu$ A.



Gambar 2.20. Simbol IC LM35

### 2.5.2 Penggunaan IC LM35

LM35 juga dapat digunakan dengan mudah dalam cara yang sama seperti lainnya sirkuit terpadu-sensor temperatur. Dalam penggunaannya dapat direkatkan atau disemen ke permukaan dan temperatur akan berada dalam sekitar 0,01 °C dari temperatur permukaan. Dianggap bahwa temperatur udara ambien hampir sama dengan temperatur permukaan, jika temperatur udara jauh lebih tinggi atau lebih rendah dari temperatur permukaan, temperatur aktual dari LM35 akan mati

pada temperatur tingkat menengah antara temperatur permukaan dan temperatur udara. Hal ini berlaku untuk model paket TO 92 plastik, di mana kawat tembaga utama pada jalur panas untuk membawa panas ke dalam perangkat, sehingga temperatur mungkin lebih mendekati temperatur udara daripada permukaan temperatur.

Pada paket TO- juga dapat disolder untuk logam permukaan atau pipa tanpa kerusakan. Tentu saja, dalam hal ini bahwa  $V_b$  pada terminal sirkuit akan didasarkan dengan logam itu. Atau, LM35 dapat dipasang di dalam logam tabung tertutup, dan kemudian dapat dicelupkan ke dalam bak mandi atau ke dalam lubang berulir dalam tangki. Seperti halnya IC LM35 dan sirkuit harus tetap terisolasi dan kering, untuk menghindari kebocoran dan korosi. Jika rangkaian beroperasi pada suhu dingin di mana kondensasi dapat terjadi. Pelapis sirkuit dan pernis seperti Humiseal dan cat epoxy atau *dips* sering digunakan untuk memastikan bahwa air tidak bisa menimbulkan korosi pada LM35 atau pada koneksi.

LM35 ini kadang-kadang disolder ke *heat sink*, untuk mengurangi waktu termal konstan dan mempercepat respon di udara terbuka. Cara lain dapat dilakukan dengan memasang massa termal kecil dapat ditambahkan ke sensor, untuk memberikan manfaat dalam membaca temperature meskipun penyimpangan temperatur kecil di udara.

## BAB III

### PERANCANGAN SISTEM

#### 3.1 DESKRIPSI UMUM

Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating pada sistem pemanasan benda kerja konduktif adalah sistem yang secara khusus dirancang untuk pemanas induksi untuk setiap aplikasi yang bertujuan memanaskan bahan atau benda kerja konduktif secara bersih, efisien dan terkendali. Dengan harapan dengan pengontrolan frekuensi ini dapat memberikan hasil yang optimal serta efisiensi yang baik dalam penggunaan energi listrik.

Secara umum ada modul ini ada 4 bagian utama yaitu sumber tenaga listrik frekuensi tinggi yang telah dikontrol oleh regulator modulasi lebar pulsa (*PWM*) mikrokontroler, sensor temperatur LM35 untuk memonitor panas yang terjadi pada benda kerja dan dapat memberikan umpan balik ke unit pengontrol, kumparan kerja (*work coil*) untuk menghasilkan medan magnet bolak-balik, sebuah benda kerja (*workpiece*) konduktif yang akan dipanaskan. Juga di lengkapi beberapa komponen pendukung seperti *LCD* untuk menampilkan status kerja sistem secara visual, LED, serta asesoris seperti potensiometer, *switch*, tombol kerja untuk penyetelan sistem, dan buzzer untuk alarm.

Pada bab ini akan dijelaskan rangkaian yang mendukung sistem pemanas induksi agar dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan, dan panas yang dihasilkan mencapai *setpoint* yang dilakukan pada sistem.

Perancangan merupakan penuangan ide dan gagasan yang didasari oleh teori-teori dasar yang mendukung. Pada proses perancangan harus diperhatikan beberapa hal diantaranya:

1. Menentukan spesifikasi sistem pemanas induksi
2. Cara pemilihan komponen yang akan digunakan
3. Mempelajari karakteristik dan data fisiknya

4. Membuat rangkaian skematik dengan melihat fungsi-fungsi komponen.
5. Realisasi system.

### 3.1.1 Spesifikasi Sistem Pemanas Induksi

Spesifikasi awal yang ingin dicapai dalam pembuatan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1. Spesifikasi Sistem Pemanas Induksi

No.	Deskripsi Alat	Jumlah
1	Mikrokontroler AT mega 16	1 Unit
2	Inverter (maksimum frekuensi 3 MHz)	1 Unit
3	Suplai daya 220 VAC 3A	1 Unit
4	Sensor temperatur LM35	1 Unit
5	Displai LCD 6x2 monochrome	1 Unit
6	Penyearah 220VAC-9VDC	1 Unit
7	Kipas (Brushless) 18VDC; 5200rpm	1 Unit
8	Kumparan kerja (tembaga) Ø2.8mm	1 Unit
9	Lampu Indikator	3 Buah
10	Tombol kontrol	4 Buah
11	Fuse 10A	1 Buah
12	Buzzer	1 Buah
13	Terminal dan kabel konektor 0.75mm	1 Set

Adapun spesifikasi yang diinginkan adalah :

- Spesifikasi umum
 

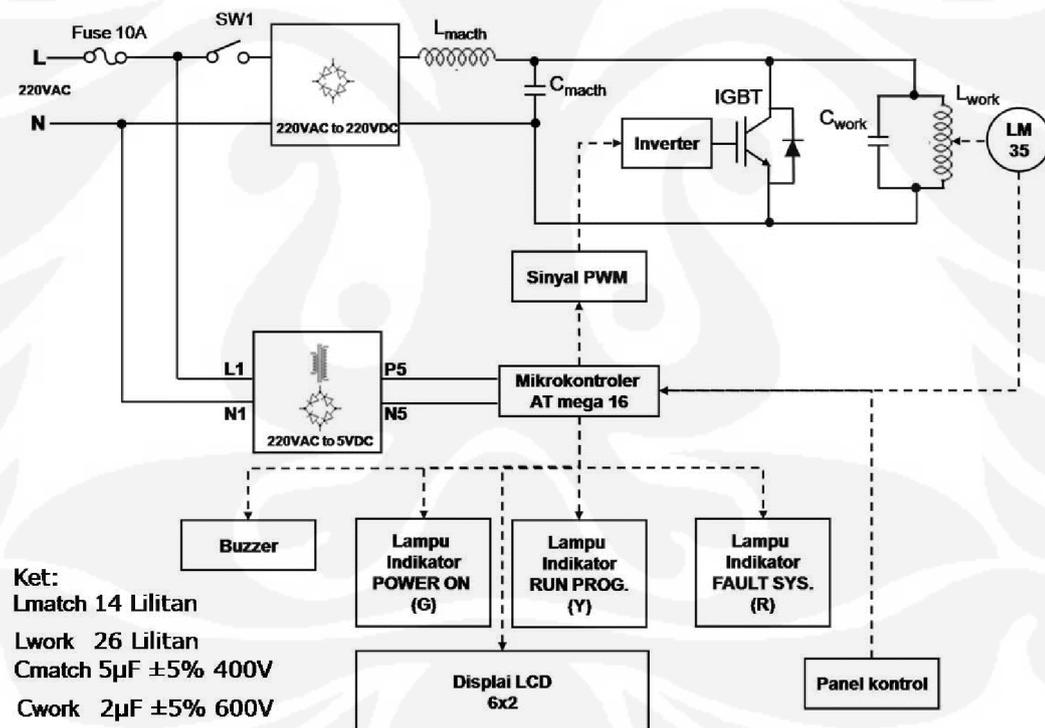
Sistem pemanas induksi dapat memberikan kenaikan temperatur pada benda kerja sesuai dengan temperatur yang diinginkan dan memiliki respon cukup cepat serta efisien dalam penggunaan energi, panas yang dihasilkan sistem pemanas dapat dikendalikan.
- Spesifikasi teknis
  - Suplai daya dapat memenuhi kebutuhan dalam proses pemanasan induksi.
  - Mikrokontroler dapat memproses data masukan dari sensor temperatur LM35 sehingga dapat menampilkan data temperatur

secara aktual, serta dapat menghentikan sistem pemanas induksi apabila terjadi kegagalan untuk menghindari kerusakan pada sistem pemanas induksi.

- 1 Unit inverter dapat mendukung kinerja kumparan kerja dengan memberikan frekuensi resonansi yang sesuai agar pemanasan induksi dapat tercapai.
- 1 unit kumparan kerja dapat bekerja dengan optimal agar pemanasan benda kerja dapat berlangsung sesuai dengan energi yang diberikan.

### 3.1.2 Perancangan Diagram Blok Sistem

Setelah spesifikasi sistem ditentukan, tahap berikutnya adalah merancang diagram blok sistem. Blok diagram ini merupakan gambaran umum mengenai prinsip kerja sistem yang akan direalisasikan.



Gambar 3.1. Rancang Bangun Sistem Kendali High Frequency Induction Heating

Rangkaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 merupakan rancangan sistem pemanas induksi yang terdiri atas suplai daya 220VAC. Masukan

sumber tegangan AC telah disearahkan dan di filter untuk memberikan suplai sebesar  $\pm 17$  V. Suplai tegangan  $\pm 17$  V digunakan untuk menyuplai inverter untuk menghasilkan keluaran gelombang persegi. Sehingga keluaran inverter akan memberikan masukan ke IGBT untuk mensuplai daya ke kumparan kerja yang terpasang secara paralel dengan kapasitor kerja  $C_w$  membangkitkan medan magnet yang kuat. Ketika benda kerja dimasukkan ke dalam kumparan kerja akan terjadi induksi sehingga benda kerja konduktif yang berada dalam kumparan kerja menghasilkan panas akibat adanya arus yang mengalir dengan frekuensi tinggi.

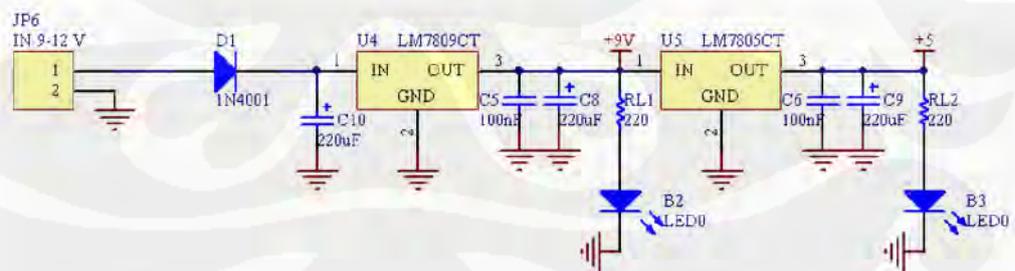
Panas yang ada pada benda kerja akibat pemanasan induksi dirasakan oleh sensor temperatur yaitu LM35. Sinyal keluaran yang dihasilkan LM35 berupa sinyal analog memberikan umpan balik ke mikrokontroler. Sinyal masukan analog tersebut dikonversi menjadi sinyal digital yang kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk ditampilkan pada display LCD.

### 3.2 PERANCANGAN SISTEM

#### 3.2.1 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

##### a. Rangkaian Catu Daya

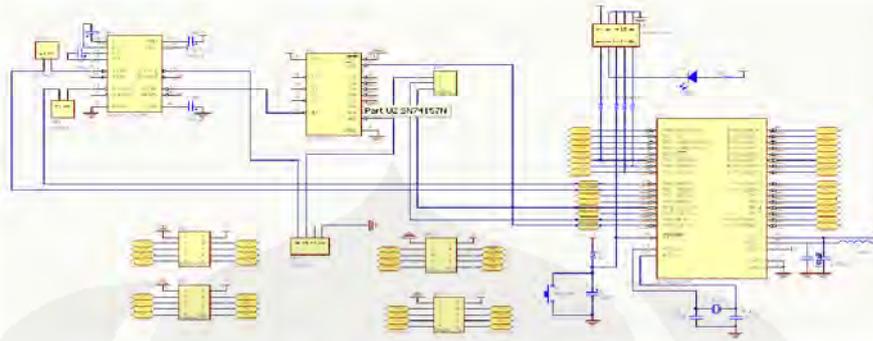
Sistem yang akan dirancang memerlukan sumber tegangan sebesar 9Vdc dan 5 Vdc. Gambar rangkaian catu daya ini dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Rangkaian catu daya mikrokontroler

##### b. Mikrokontroler AT Mega16

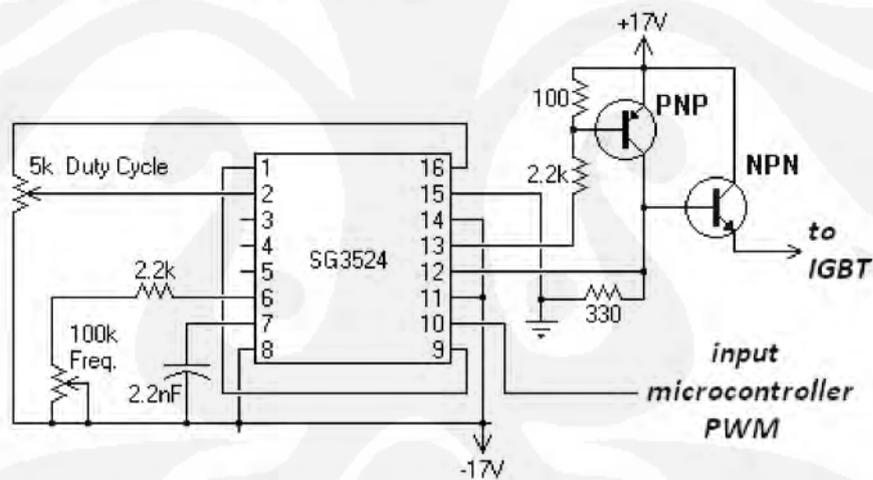
Microkontroler merupakan rangkaian pemroses data yang terdiri dari beberapa blok, yaitu:



Gambar 3.3. Sistem minimum dari ATmega16

### c. Inverter

Pada inverter menggunakan prinsip kerja regulator modulasi lebar pulsa (*PWM*) yang menggunakan IC SG3524. Output pada PWM ini berupa gelombang persegi. Gambar 3.2 menunjukkan skematik rangkaian kerja inverter yang telah diatur lebar pulsa keluaran dari IC SG3524 .



Gambar 3.4. Rangkaian inverter menggunakan IC SG3524

SG3524 adalah regulator modulasi lebar pulsa (PWM) yang dilengkapi regulator tegangan rangkaian kontrol. Regulator beroperasi pada frekuensi tetap yang diprogram oleh satu resistor waktu,  $R_T$ , dan satu kapasitor waktu  $C_T$ .  $R_T$  menetapkan pengisian konstan saat  $C_T$  bekerja. Hal ini menghasilkan tegangan linier pada  $C_T$ , yang diumpangkan ke pembanding, dan menyediakan kontrol linier dari durasi pulsa keluaran (lebar) oleh amplifier kesalahan. SG3524 berisi *onboard* 5-V regulator yang berfungsi sebagai referensi, serta menyediakan pengendalian internal rangkaian regulator.

Tegangan referensi internal dibagi secara eksternal oleh jaringan tangga resistor untuk menyediakan referensi dalamkisaran umum-mode dari amplifier kesalahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. Referensi eksternal dapat digunakan oleh rangkaian pembagi tegangan pada resistor kedua dan sinyal kesalahan diperkuat. Tegangan ini kemudian dibandingkan dengan tegangan linier pada  $C_T$ . Sinyal keluaran pulsa termodulasi yang dihasilkan dari komparator kemudian mengatur keluaran yang sesuai pada transistor (Q1 atau Q2) oleh gelombang persegi pulsa flip flop, yang serentak diatur oleh osilator keluaran. Pada pulsa keluaran output osilator juga berfungsi sebagai pulsa *blanking* untuk memastikan kedua keluaran tidak pernah di bersamaan selama masa transisi. Durasi pulsa blanking dikontrol oleh nilai  $C_T$ . Keluaran dapat dapat digunakan dalam konfigurasi *push-pull* di mana frekuensi adalah satu-setengah dari osilator dasar, atau paralel untuk aplikasi tunggal berakhir di mana frekuensi sama dengan yang osilator. Output dari kesalahan dibandingkan komparator dengan pembatas arus dan rangkaian menutup dan dapat diterima ditimpa oleh sinyal dari salah satu dari input.

SG3524 memiliki suplai tegangan kerja sebesar 17 VDC, keluaran pada pin 12 dan 13 sebesar  $V_{cc}$  yang diberikan yaitu 17 V berupa gelombang persegi yang lebar pulsa keluaran telah diatur. Frekuensi yang diatur untuk pemanas induksi sebesar 27 kHz. Dengan mengatur potensiometer ( $R_T$ ) yang merupakan resistor timing pada Resistor Timing Hal ini sesuai dengan persamaan dibawah ini:

$$f = \frac{1,30}{R_T \times C_T} \dots\dots\dots (3.1)$$

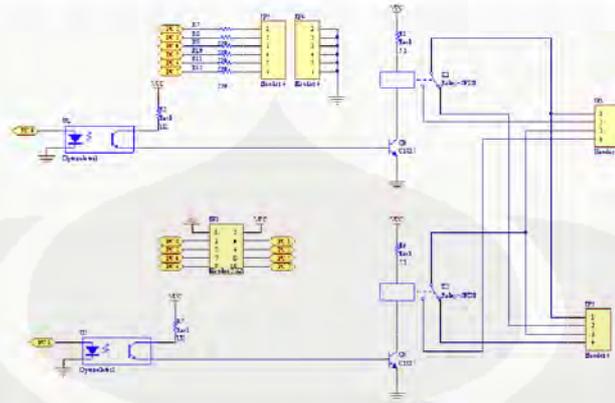
Dimana  $R_T = 21,8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_T = 2,2 \text{ nF}$

$$f = \frac{1,30}{21,8 \cdot 10^3 \times 2,2 \cdot 10^{-9}}$$

Maka  $f = 27 \text{ kHz}$

Keluaran pin 12 dan 13 adalah gelombang pesegi yang bekerja secara bergantian, seperti yang diperlihatkan Gambar 3.5 Gelombang persegi yang dibangkitkan mengatur kerja transistor PNP dan NPN.

**d. Rangkaian displai LCD dan perangkat input tombol**

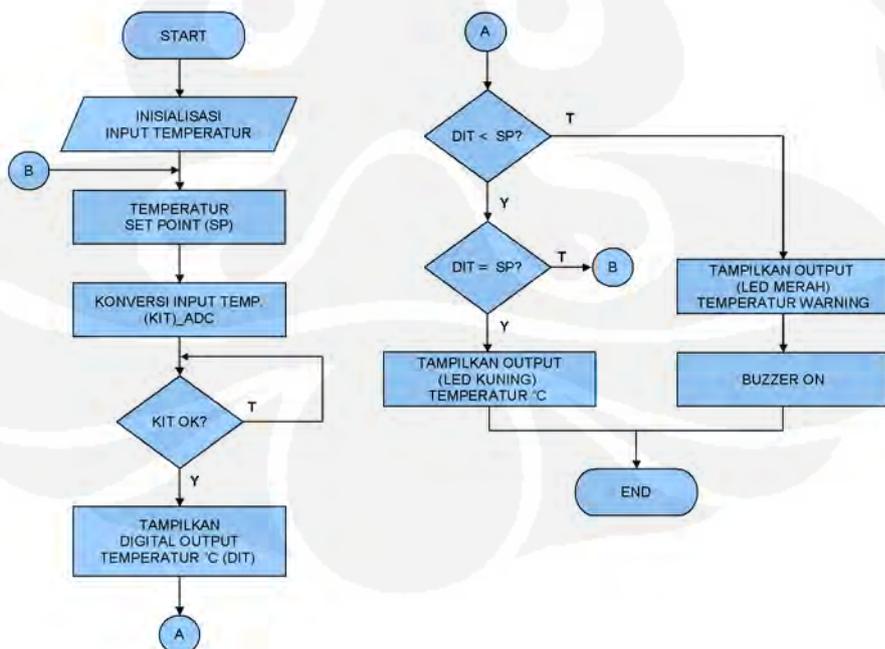


Gambar 3.5. Rangkaian displai LCD dan perangkat *interface*

Pada rangkaian ini dirancang untuk menampilkan temperatur aktual dari sistem pemanasan induksi pada unit LCD 6x2.

**3.2.2 Perancangan Perangkat Lunak**

Perangkat lunak yang digunakan adalah BASCOM AVR. Perancangan perangkat lunak dilakukan dengan membuat diagram alir terlebih dahulu dari perangkat lunak yang akan direalisasikan. Berikut adalah diagram alir (*flowchart*) dari program yang akan dibuat.



Gambar 3.6. Diagram alir sistem kendali pemanas induksi

### 3.3 PERANCANGAN SISTEM KESELURUHAN

Realisasi merupakan suatu tahapan pada pembuatan proyek akhir ini. Tujuan realisasi adalah untuk mewujudkan hasil perancangan yang telah dilakukan sebelumnya agar alat dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Dalam merealisasikan alat ini terbagi dalam dua bagian yaitu:

- Realisasi perangkat keras
- Realisasi perangkat lunak

#### 3.3.1 Realisasi Perangkat Keras

Dalam merealisasikan perangkat keras ini ada beberapa tahapan yang dilakukan yaitu:

##### 1. Pengujian rangkaian pada papan percobaan (protoboard)

Tahap pertama dalam realisasi perangkat keras adalah pengujian rangkaian yang telah dirancang sebelumnya. Rangkaian diuji bagian agar dipastikan terlebih dahulu bahwa rangkaian tersebut dapat bekerja dengan baik.

##### 2. Pembuatan PCB

Dalam proses pembuatan PCB menggunakan perangkat lunak pembantu yaitu PROTEL DXP2004. Adapun langkah-langkah pembuatan PCB dengan menggunakan PROTEL DXP2004 adalah:

- a. Pertama kita membuat skematik rangkaian setiap blok.
- b. Menentukan *footprint* setiap komponen.
- c. Setelah semua komponen diberi *footprint*, kemudian lakukan proses *create netlist*.
- d. Kemudian membuat *file* PCB baru dan ambil *netlist* yang telah dibuat dengan *load nets*.
- e. Setelah semua *netlist* benar kemudian dieksekusi.
- f. Setelah dieksekusi kemudian atur bentuk PCB yang diinginkan (ukuran jalur, ukuran lubang, ukuran PCB dan lain-lain.)

g. Setelah pembuatan PCB selesai maka dilakukan proses pengecekan jalur PCB, pemasangan dan penyolderan komponen.

h. Pengecekan jalur PCB

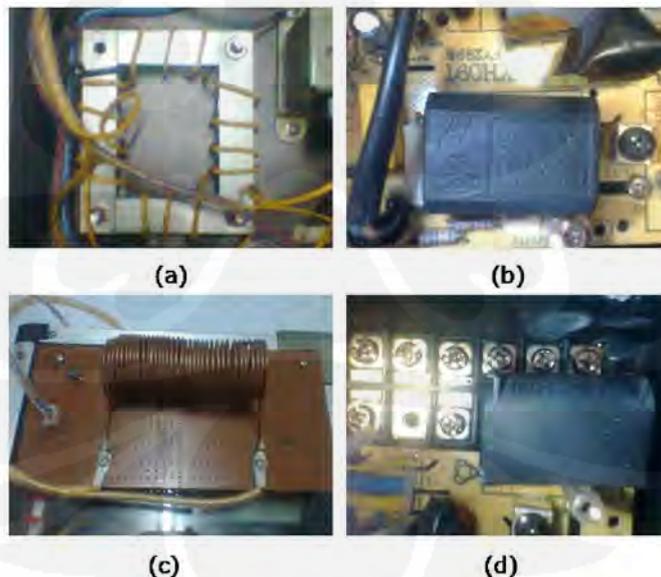
Tahap ini dilakukan untuk memastikan jalur PCB tidak ada jalur yang tersambung (*short*) atau terputus

i. Pemasangan dan penyolderan komponen

Setelah PCB dipastikan dalam keadaan baik, maka komponen dipasang pada tempatnya sesuai dengan layout komponennya.

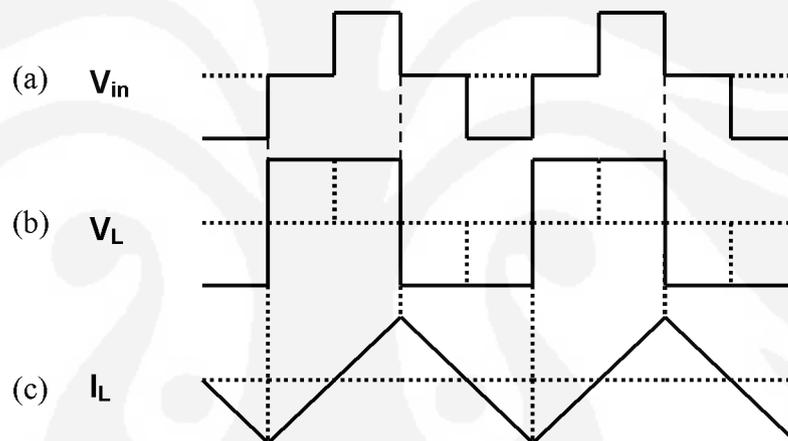
j. Pembuatan  $L_{match}$ ,  $C_{match}$ ,  $L_{work}$  dan  $C_{work}$ ,

Pada tahap ini adalah pembuatan komponen vital dari sistem pemanas induksi, tanpa komponen ini tidak akan terjadi efek medan magnet yang menimbulkan arus eddy pada benda kerja konduktif. Kumparan kerja  $L_{work}$  berdiameter 2,8mm dengan jumlah lilitan 26 yang digabungkan dengan kumparan penyesuai  $L_{match}$  yang memiliki jumlah lilitan sebanyak 14 lilitan. Penggabungan kedua kumparan ini menghasilkan 130.0 $\mu$ H ketika dilakukan pengukuran dengan alat ukur LCR meter.



Gambar 3.7. (a)  $L_{match}$ ; (b)  $C_{match}$ ; (c)  $L_{work}$ ; (d)  $C_{work}$

Agar rangkaian menghasilkan resonansi dalam frekuensi tinggi maka kapasitor kerja dipasang secara paralel dengan kapasitor kerja  $C_{work}$  dalam frekuensi tinggi. Kapasitor yang dipasang secara paralel terhadap  $L_{work}$  memiliki nilai  $2\mu F$ . Kemudian  $C_{macth}$  yang dipasangkan seri terhadap  $L_{macth}$  memiliki nilai  $5\mu F$ . Dengan rangkaian adanya komponen  $L_{macth}$  dan  $C_{macth}$  seri serta  $L_{work}$  dan  $C_{work}$  paralel maka dapat dikatakan sistem pemanas ini telah dilengkapi oleh rangkaian tangki resonansi seri-paralel yang berfungsi sebagai rangkaian resonansi yang mampu bekerja dalam frekuensi tinggi untuk mendukung proses pemanasan induksi.



Gambar 3.8 (a)  $V_{in}$  yang dihasilkan inverter,

(b)  $V_L$  tegangan pada kumparan kerja,

(c)  $I_L$  Arus yang mengalir pada kumparan kerja saat terjadi pembebanan



Gambar 3.9. Realisasi perangkat keras Rancang Bangun Sistem Kendali  
High Frequency Induction Heating

### 3.3.2 Realisasi Perangkat Lunak

Realisasi perangkat lunak adalah proses pembuatan perangkat lunak sesuai dengan diagram alir yang telah dibuat.

Dalam merealisasikan perangkat lunak ini ada beberapa tahapan yang dilakukan yaitu:

1. Menentukan bahasa pemrograman yang dipakai adalah bahasa BASCOM (*BASIC Compiler*).
2. Menentukan software yang digunakan untuk pemrograman adalah BASCOM AVR.
3. Menentukan software yang digunakan untuk simulasi program adalah BASCOM Atmega16.
4. Membuat dan menguji program dengan cara mensimulasikan dan mencoba di sistem minimum ATmega16.

5. *Mendownload* program yang telah dibuat ke dalam mikrokontroler ATmega16.
6. Menguji program pada hardware yang telah dibuat.



## **BAB IV**

### **PENGUJIAN DAN ANALISA SISTEM**

#### **4.1 PENGUJIAN DAN ANALISA**

Tujuan dari pengujian tugas akhir ini adalah untuk mengetahui kesesuaian spesifikasi sistem antara perancangan sehingga dapat membandingkan kinerja, presentasi error dan kehandalan (reability) dalam implementasinya dan untuk mengetahui penyebab-penyebab ketidaksempurnaan alat serta menganalisa untuk perbaikan selanjutnya. Dalam pengujian ini yang perlu diperhatikan adalah tentang ketepatan perangkat lunak dalam mengakomodasi dan mengkoneksikan semua periferal apakah sesuai dengan yang direncanakan atau belum.

#### **4.2 METODOLOGI PENGUJIAN**

##### **1. Pengujian Tiap Blok**

- Pengujian rangkaian antar muka RS-232
- Pengujian proses komunikasi serial antara sensor termokopel dengan PC menggunakan *Hyper Terminal*
- Pengujian proses komunikasi serial antara LCD dengan mikrokontroler
- Pengujian panel kontrol
- Pengujian frekuensi pada kumparan kerja menggunakan osiloskop.
- Pengujian tegangan keluaran  $V_{out}$  yang dihasilkan sensor LM35 terhadap perubahan temperatur

##### **2. Pengujian Sistem Keseluruhan**

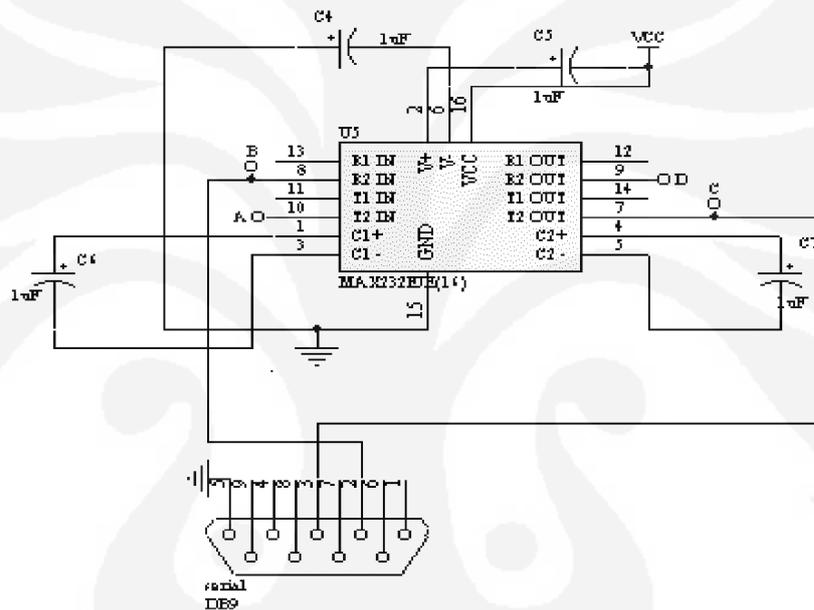
- Pengujian program secara keseluruhan, yaitu pengujian membaca sensor temperatur termokopel sebagai masukan untuk menentukan area kerja sistem pemanasan induksi agar sistem dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan, dan untuk menghindari terjadinya kelebihan panas yang berakibat

merusak sistem tersebut. Pengujian frekuensi yang diberikan pada kumparan kerja tanpa benda kerja dan dengan menggunakan benda kerja konduktif dengan osiloskop

### 4.3 PENGUJIAN TIAP BLOK

#### 4.3.1 Pengujian rangkaian antar muka RS-232

Untuk mengetahui apakah rangkaian antar muka komunikasi serial berjalan dengan baik, maka dilakukan langkah-langkah pengukuran sebagai berikut :



Gambar 4.1. Pengukuran rangkaian antar muka serial

Lihat pada gambar 4.1

1. Berikan tegangan catu pada VCC sebesar 5 volt
2. Berikan tegangan input sebesar 12 volt pada titik B (R2in) kemudian ukur tegangan pada titik D (R2out) dengan multimeter.
3. Ulangi langkah nomor 2 dengan merubah tegangan input menjadi -12volt.
4. Beri tegangan input sebesar 5 volt pada titik A (T2in) kemudian ukur tegangan keluaran pada titik C (T2out) dengan multimeter.
5. Ulangi langkah nomor 4, dengan merubah input tegangan menjadi 0 volt.
6. Ulangi semua langkah 1-5 untuk kaki-kaki R1in, R1out, T1in, T1out.

Tabel 4.1 Data hasil pengukuran rangkaian antar muka RS-232

Input titik A	Output titik C	Input titik B	Output titik D
0V	10V	12V	0V
5V	-10V	-12V	5V

(a)

(b)

Tingkat tegangan RS-232 untuk logika 0 adalah antara +3 sampai dengan +15 volt, sedangkan untuk logika 1 antara -3 sampai -15 volt. Pengujian rangkaian antar muka pada bagian konversi dari standar RS-232 ke standar TTL, dilakukan dengan cara memberikan tegangan +12V dan -12V dari input *converter* RS-232 ke TTL. Dari data yang diperoleh dapat dilihat bahwa keluaran berlogika 0 untuk input 12 V, sedangkan untuk input -12 V menghasilkan keluaran logika 1. Untuk pengujian rangkaian antar muka bagian konversi dari TTL ke RS-232, dilakukan dengan cara melakukan pengukuran yang berkebalikan dari pengukuran sebelumnya. Yaitu dengan cara memberikan tegangan 0V dan 5V pada input TTL. Dari data yang diperoleh dapat dilihat bahwa keluaran untuk input 0 V (logika 0) adalah 10 V dan untuk input 5 V (logika 1) adalah -10V. Dapat disimpulkan bahwa kondisi tegangan yang terjadi sudah memenuhi tingkat tegangan RS-232 untuk logika 0 dan logika 1.

#### 4.3.2 Komunikasi serial antara LM35 dengan mikrokontroler

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor termokopel ke mikrokontroler melalui port serial RS-232 kemudian buka salah satu program pada PC yaitu *Hyper Terminal*. Sensor temperatur yang akan diuji untuk mengetahui perubahan masukan data ketika termokopel dipanaskan.

Berikut ini merupakan langkah-langkah pengujian dengan *Hyper Terminal*:

Pada saat buka program *Hyper Terminal* akan muncul kotak *Connection Description*. Pada kotak tersebut harus diisikan nama dan icon untuk koneksi.



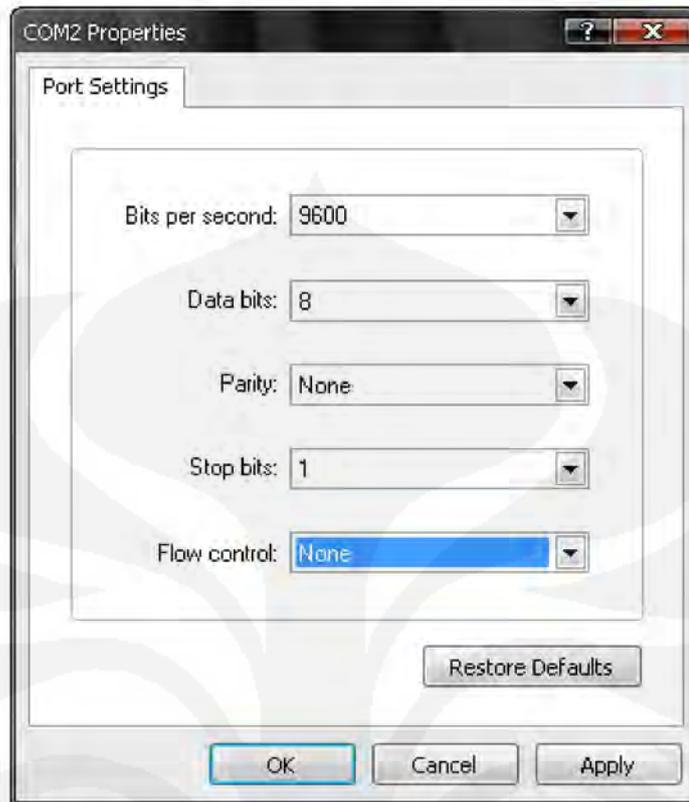
Gambar 4.2. Pengujian koneksi LM35

Setelah kotak Connection Description terisi maka akan muncul kotak berikutnya sebagai berikut:



Gambar 4.3. Penggunaan koneksi LM35 pada hyper terminal

Pada kotak Connect to terdapat bagian yang tertulis Connect using, maka dapat memilih untuk hubungan COM2. setelah menekan OK maka kotak selanjutnya adalah COM2 Properties yaitu untuk menyetting portnya.



Gambar 4.4. Port Setting pada com 2

Pada kotak diatas, Bits per second dipilih 9600 dan Flow Controlnya dipilih None. Setelah penyetingan selesai, maka akan muncul tampilan utama Hyper Terminal.



Gambar 4.5. Hasil eksekusi pada hyper terminal

Ketika tampilan utama Hyper Terminal muncul, maka akan muncul tulisan  1707F86768FF♥, hal ini mengindikasikan bahwa sensor termokopel berjalan dengan baik.

#### 4.3.3 Komunikasi serial antara LCD dengan mikrokontroler

Proses pengujian ini dilakukan dengan menjalankan program sederhana dengan AVR BASCOM menggunakan Atmega16 yaitu dengan menampilkan tulisan bahwa sensor termokopel bekerja atau tidak ke LCD.

Dengan list program sebagai berikut:

```
$regfile = "m16def.dat"
$crystal = 8000000
$baud = 19200
$data

*****INISIALISASI LCD*****
Config Lcdbus = 4
Config Lcd = 16 * 2
Config Lcdpin = Pin , Db4 = Pa.0 , Db5 = Pa.1 , Db6 = Pa.2 , Db7 = Pa.3 , _
E = Pa.5 , Rs = Pa.4
Cls
Cursor Off

*****INISIALISASI LM35*****
Config Serialin = Buffered , Size = 100
Dim A As Byte
Dim Cek As String * 1
Dim Comment1 As String * 100
Dim Comment2 As String * 2
Enable Interrupts
*****CEK KONEKSI SENSOR LM35*****
Cek_hp:
    Cek = ""
    Comment1 = ""
Print "AT"
Waitms 200
A = 0
Do
    Incr A
    Cek = Inkey()
    Comment1 = Comment1 + Cek
Loop Until Cek = "K" Or A = 50
Comment2 = Right(comment1 , 2)
Cls
Lcd Comment2
```

‘Tampilan 1

```

Wait 1
If Comment2 = "OK" Then
    Cls
    Lcd "PENGENDALI TEMPERATUR"           'Tampilan 2
    Waitms 500
Else
    Cls
    Lcd "menu set point"                 'Tampilan 3
    Waitms 500
End If
End

```

Program ini menghasilkan tampilan pada LCD yaitu sebagai berikut:



Gambar 4.6. Tampilan 1 pengendali temperatur pada LCD



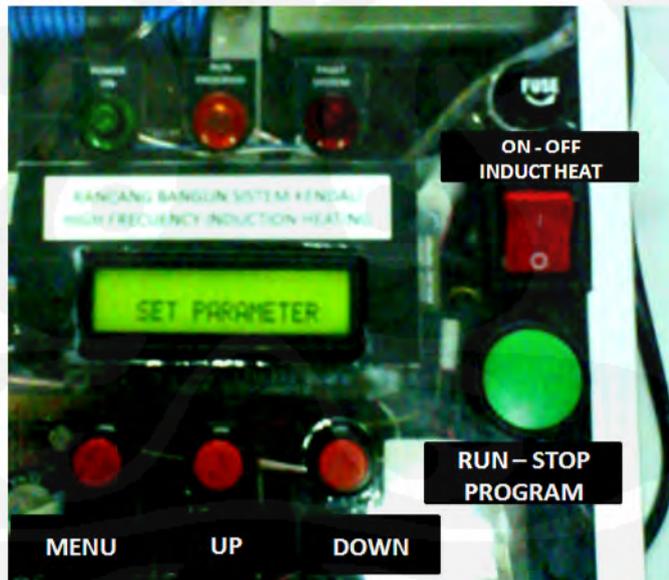
Gambar 4.7. Tampilan 2 *set point* pada LCD



Gambar 4.8. Tampilan 3 *set overheat* pada LCD

#### 4.3.4 Pengujian panel kontrol

Pada tahap ini telah dilakukan pengujian secara berulang pada bagian panel kontrol untuk memastikan sistem dapat bekerja sesuai dengan perintah masukan yang diberikan.



Gambar 4.9. Pengujian kontrol panel pada sistem pemanas induksi

Berikut ini tabel hasil pengamatan dalam pengujian instrumen kontrol panel pada sistem pemanas induksi.

Tabel 4.2. Pengujian instrumen panel kontrol pada sistem pemanas induksi

No.	Jenis Instrumen	Fungsi	Hasil uji
1	Lampu indikator hijau	sebagai indikator sistem telah mendapat suplai daya	Baik
2	Lampu indikator kuning	sebagai indikator sistem telah mengesekusi program/sistem melakukan pemanasan	Baik
3	Lampu indikator merah	sebagai indikator jika terjadi kegagalan pada sistem pemanas	Baik
4	Tombol menu	untuk memilih fungsi set variabel, run program	Baik
5	Tombol <i>up</i>	menaikkan nilai variabel temperatur yang diinginkan	Baik
6	Tombol <i>down</i>	menurunkan nilai variabel temperatur yang diinginkan	Baik
7	Tombol <i>run-stop program</i>	berfungsi untuk mengesekusi atau menghentikan program yang telah ditentukan variabel temperatur	Baik
8	Displai LCD	menampilkan status sistem yang sedang berlangsung	Baik

#### 4.3.5 Pengujian kumparan kerja menggunakan LCR meter



Gambar 4.10. Pengukuran induktansi kumparan kerja 40 lilitan menggunakan LCR meter

Pengukuran kumparan kerja untuk mengetahui nilai induktansi menggunakan alat ukur LCR meter Boonton yang telah dikalibrasi terlebih dahulu. Kumparan kerja yang telah didesain memiliki ukuran  $\text{Ø}25\text{mm}$  terbuat dari material *tubing* tembaga dengan  $\text{Ø}2.8\text{mm}$ . Pada awalnya dengan jumlah lilitan 40 lilitan diperoleh induktansi sebesar  $130.0\mu\text{H}$ .

Pengamatan selanjutnya dengan mengurangi lilitan kumparan kerja menjadi 35 lilitan, sehingga diperoleh nilai induktansi sebesar  $119.1\mu\text{H}$ .



Gambar 4.11. Pengukuran induktansi kumparan kerja 35 lilitan menggunakan LCR meter

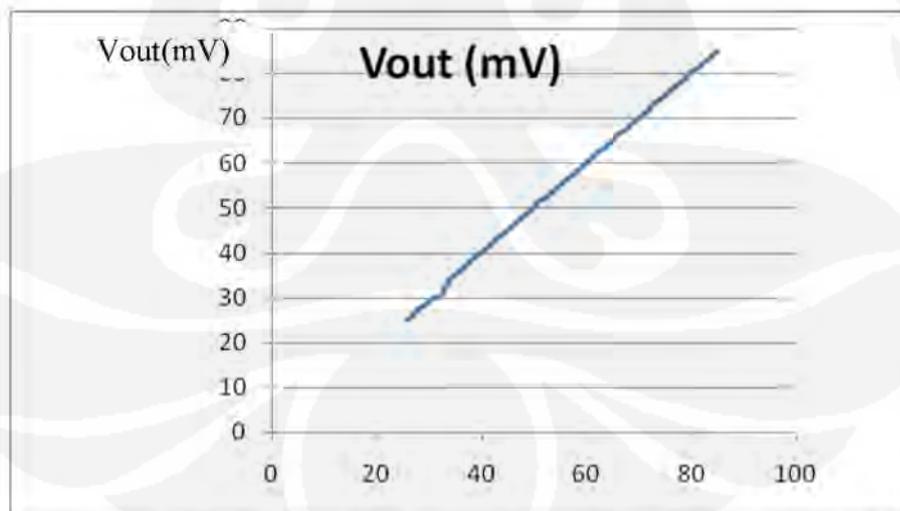
Pada pengamatan ini dapat dianalisa bahwa besarnya nilai induktansi ditentukan oleh jumlah lilitan, semakin banyak lilitan maka nilai induktansi akan bertambah pula. Nilai induktansi juga dapat dipengaruhi oleh inti kumparan yang menyelubunginya. Inti berbahan ferit memiliki pengaruh terhadap nilai induktansi.

#### **4.3.6 Pengujian tegangan keluaran $V_{out}$ yang dihasilkan sensor LM35 terhadap perubahan temperatur**

Pada pengujian sensor temperatur LM35 dilakukan dengan memberikan kenaikan temperatur lalu pada pin 2 LM35 terukur nilai  $V_{out}$  dalam satuan mV. Dari data yang diperoleh terlihat cukup konstan. Pada grafik sensor LM35 menunjukkan respon yang cukup linear.

Tabel 4.4. Data pengukuran sensor temperatur LM35

Temperatur (°C)	Vout (mV)	Temperatur (°C)	Vout (mV)	Temperatur (°C)	Vout (mV)
26	25	46	46	66	66.5
27	26	47	47.1	67	67
28	27.5	48	48	68	68
29	28	49	49	69	69
30	29	50	50.1	70	70
31	30	51	51.6	71	71
32	30	52	52	72	72
33	32	53	53	73	73.5
34	34	54	54	74	74.2
35	35	55	55	75	75
36	36	56	56	76	76.2
37	37	57	57	77	77.2
38	38.3	58	58	78	78
39	39.1	59	59	79	79
40	40	60	60	80	80.5
41	41	61	61	81	81
42	42	62	62.3	82	82
43	43.3	63	63	83	83
44	44	64	64	84	84
45	45	65	65	85	85



Gambar 4.12. Grafik kenaikan temperatur terhadap Vout (mV) LM35

#### 4.4 PENGUJIAN SISTEM KESELURUHAN

Pengujian sistem keseluruhan, yaitu pengujian membaca sensor temperatur termokopel sebagai masukan untuk menentukan area kerja sistem pemanasan induksi agar sistem dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan, dan untuk menghindari terjadinya kelebihan panas yang berakibat merusak sistem tersebut.

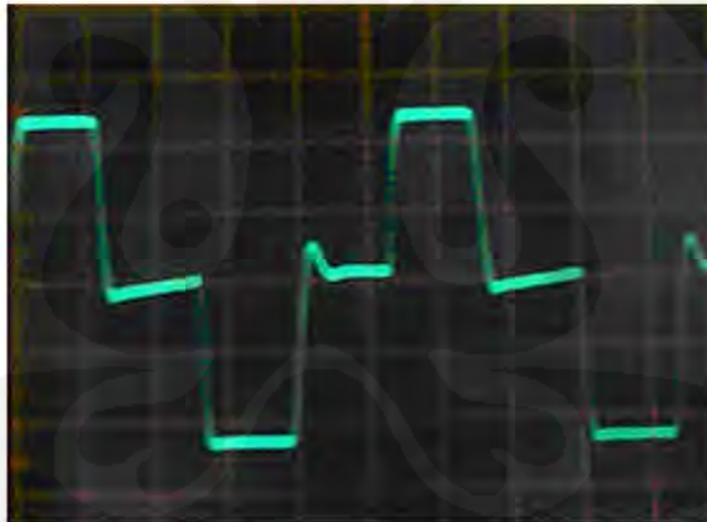
Pada pengujian sistem ini dapat di aplikasikan pada benda kerja konduktif. Namun, pada tugas akhir ini sistem pemanasan diaplikasikan pada sebuah penampang logam berbentuk silinder berdiameter 20mm

Pengujian cara kerja sistem ini melalui 2 mekanisme, yaitu :

1. Pengujian pemanas induksi tanpa benda kerja.
2. Pengujian pemanas induksi dengan benda kerja benda kerja konduktif berdiameter 20mm.

##### 4.4.1 Pengujian pemanas induksi tanpa benda kerja konduktif

Pengujian frekuensi yang diberikan pada kumparan kerja tanpa benda kerja konduktif dengan osiloskop.



Gambar 4.13. Frekuensi keluaran inverter 27kHz pada kumparan kerja

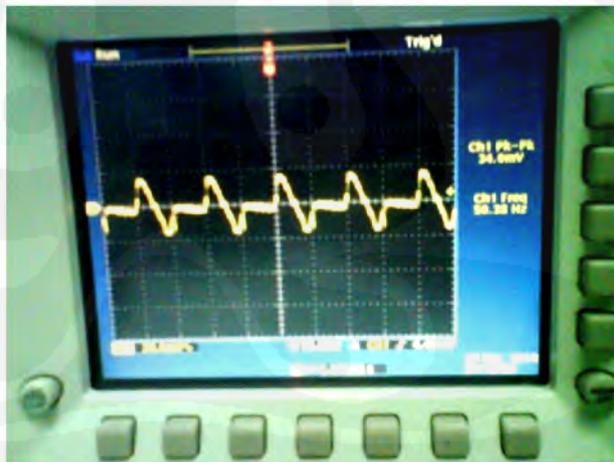
Dapat dilihat arus reaktif yang muncul pada ujung kumparan kerja yang dihubungkan pada osiloskop.



Gambar 4.14. Bentuk gelombang arus pada tangki resonansi paralel  
Pengaturan puncak ke puncak dari suplai tegangan dengan arus yang terukur 3mA pada ujung kumparan kerja dalam kondisi tidak menggunakan benda kerja . Hal dikarenakan tidak ada beban pada sehingga tidak ada arus yang signifikan pada kumparan kerja.

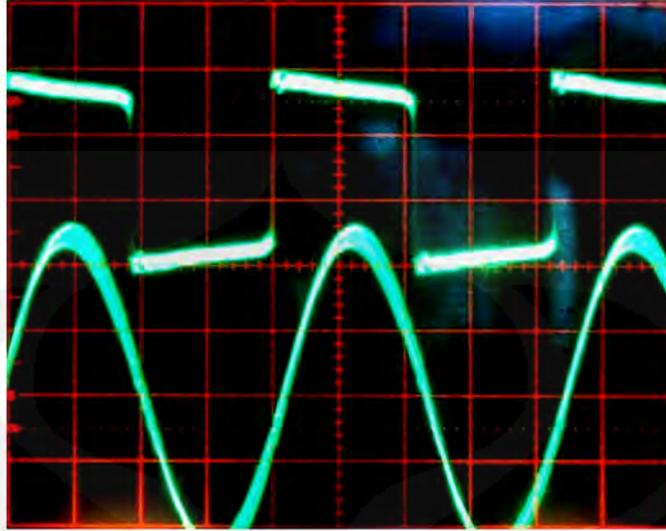
#### 4.4.2 Pengujian frekuensi kerja yang diberikan pada kumparan kerja

Pengujian frekuensi yang diberikan pada kumparan kerja tanpa benda kerja konduktif dengan osiloskop.



Gambar 4.15. Frekuensi 27kHz pada kumparan kerja

Dapat dilihat arus reaktif yang muncul pada ujung kumparan kerja yang dihubungkan pada osiloskop. Frekuensi 27 kHz ini bentuk gelombang tidak terjadi perubahan yang signifikan. Lihat Gambar 4.15.



Gambar 4.16. Bentuk gelombang arus pada tangki resonansi paralel

Ketika kumparan dimasukan bendakerja konduktif terjadi peningkatan arus yang besar yaitu 2,7 A. Arus yang mengalir cukup besar sehingga benda kerja konduktif menjadi panas hingga mencapai suhu 90 °C dalam waktu singkat.

## BAB V

### KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengujian alat, maka diperoleh beberapa kesimpulan yang diharapkan bermanfaat untuk perbendaharaan ilmu dan teknologi serta bagi kelanjutan dalam penyempurnaan tugas akhir ini terdapat beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Dalam penelitian ini telah menghasilkan perangkat sistem pemanas menggunakan metode pemanasan induksi dengan frekuensi tinggi .
2. Sistem pemanas induksi bekerja dengan baik apabila induktansi, kapasitansi, dan resistansi pada benda kerja sesuai dan arus frekuensi tinggi yang bekerja sesuai dengan kebutuhan, dalam hal ini diperlukan penyetelan frekuensi tinggi agar dapat menghasilkan panas pada benda kerja.
3. Perubahan panas yang pada benda kerja konduktif dapat dilakukan dengan frekuensi kerja 27 kHz. Diluar frekuensi kerja tersebut benda kerja konduktif tidak mengalami pemanasan induksi secara optimal.
4. Sistem pemanas induksi berfungsi dengan baik. Mikrokontroler dapat menerima respon dari sensor temperatur LM35.
5. Pada rangkaian catu daya, hasil tegangan keluaran yang didapatkan tidak sama dengan tegangan yang diharapkan. Hal ini terjadi kerugian akibat impedansi total pada rangkaian tangki paralel yang tidak sesuai.
6. Sistem ini dapat dikembangkan untuk sistem pemanas induksi kapasitas kecil, seperti alat pensteril peralatan medis yang berukuran kecil. Dengan pengembangan lain unguin pemanas induksi yang telah dibuat dapat dimodifikasi untuk keperluan lain yang bermanfaat tanpa harus mengkonsumsi daya yang besar.
7. Sistem pemanas induksi ini dapat dikembangkan dalam hal sistem yang dapat beradaptasi terhadap perubahan benda kerja. Sehingga sistem ini dapat menyesuaikan frekuensi kerja yang dibutuhkan kumparan kerja ketika

memanaskan benda kerja konduktif dengan tingkat kesalahan dan reabilitas yang tinggi.

8. Pada pengembangan berikutnya dapat diaplikasikan pada peralatan khusus yang dapat digunakan seperti pemasangan dan pelepasan bearing dari porosnya, sehingga dengan memanaskan permukaan bearing agar pemasangan atau pelepasan dapat dilakukan dengan mudah.

## DAFTAR ACUAN

- [1] [http://eprints.undip.ac.id/7791/1/RANCANG\\_BANGUN\\_SISTEM\\_TELEMETRI\\_SUHU\\_DAN\\_KELEMBABAN\\_MENGGUNAKAN\\_MIKROKONTROLER\\_ATMEGA16\\_DENGAN\\_ANTARMUKA.pdf](http://eprints.undip.ac.id/7791/1/RANCANG_BANGUN_SISTEM_TELEMETRI_SUHU_DAN_KELEMBABAN_MENGGUNAKAN_MIKROKONTROLER_ATMEGA16_DENGAN_ANTARMUKA.pdf)
- [2] <http://www.te.ugm.ac.id/~bsutopo/irwan.pdf>
- [3] <http://www.pdf-searcher.com/ALAT-PEMANTAU-SUHU-RUANGAN-MELALUI-WEB-BERBASISKAN-MIKROKONTROLER.html>
- [4] L. Michalski, et al. John Wiley & Sons:”[Temperature Measurement 2nd Edition](#) “
- [5] Lingga Wardhana: “BELAJAR SENDIRI MICROKONTROLER AVR SERI ATMEGA 8535 SIMULASI, HARDWARE, DAN APLIKASI”
- [6] Albert Paul Malvino: “Electronic Principles 3<sup>rd</sup> Edition”
- [7] Suhata ST:“Aplikasi Mikrokontroler sebagai Pengendali Peralatan Elektronik”

## DAFTAR PUSTAKA

1. Edy Suwanto, Benny Witono, *"Ilmu Listrik I"*, PEDC Bandung 1982
2. Noel M. Morris, *"Aplikasi Listrik dan Elektronika"*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 1988.
3. Didin Wahyudin, *"Belajar Mudah Mikrokontroler AT89S52 dengan Bahasa BASIC Menggunakan BASCOM-8051"*, Penerbit ANDI, Ed. I, Yogyakarta, 2007.
4. Eko Putra, Afgianto, *"Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (Teori dan Aplikasi)"*, Gava media, Edisi Kedua, Yogyakarta, 2004.
5. Valery Rudnev, Raymond Cook, Micah Black, *"Handbook of Induction Heating,"*  
published by INDUCTOHEAT, Inc., Madison Heights, Michigan, USA, 2003.
6. Stanley Zinn and S. L. Semiatn, *"Elements of Induction Heating,"* published by Electric Power Research Institute (EPRI) and Distributed by ASM International, 1988.

## LAMPIRAN 1

```
$regfile = "m16def.dat"
$crystal = 11059200
$baud = 9600

'*****konfigurasi
port*****
Config Lcdbus = 4
Config Lcdpin = Pin , Db4 = Pc.4 , Db5 = Pc.5 , Db6 = Pc.6 ,
Db7 = Pc.7 , E = Pc.2 , Rs = Pc.0
Config Lcd = 16 * 2
Cursor Off

Config Pina.0 = Input
Config Pina.1 = Output
Config Pina.2 = Output
Config Pina.3 = Output
Config Pina.4 = Input
Config Pina.5 = Input
Config Pina.6 = Input
Config Pina.7 = Input

Config Portd = Output
Config Timer1 = Pwm , Prescale = 1024 , Pwm = 8 , Compare A
Pwm = Clear Down , Compare B Pwm = Clear Down
Config Serialin = Buffered , Size = 150
Config Adc = Single , Prescaler = Auto , Reference = Avcc
Start Adc
Config Debounce = 30

'Debounce Pina.3 , 0 , C_kanan
'Debounce Pina.4 , 0 , C_atas
'Debounce Pina.5 , 0 , C_set
'Debounce Pina.6 , 0 , C_bawah
'Debounce Pina.7 , 0 , C_kiri

'C_kanan Alias Pina.3
C_atas Alias Pina.6
C_set Alias Pina.4
C_bawah Alias Pina.5
C_menu Alias Pina.7
'C_kiri Alias Pina.7
'Buzzer Alias Portb.4

Lad_hijau Alias Porta.1
Lad_merah Alias Porta.2
Lad_kuning Alias Porta.3
```

```

*****Variabel*****
*****
Dim A As Byte ,
Dim Menu As Byte
Dim Pck As Byte

Dim Adc1(50) As Word
Dim Index As Word
Dim Volt_sh As Single
Dim Volt_sh2 As Single
Dim Suhu As Byte
Dim Suhu2 As Byte
Dim Jmk As Byte
Dim Ukur As Word

A = 1
Menu = 2
Pck = 15
Suhu2 = 25

'Buzzer = 1

Lad_hijau = 0
Lad_merah = 0
Lad_kuning = 0

Readeeprom Pck , 1

*****Program
Utama*****

Utama:
Lad_hijau = 1
Cls
For A = 1 To 10
  Locate 1 , 16
  Lcd "WELCOME"
  Waitms 100
  Shiftlcd Left
Next
Waitms 500
Cls
Locate 1 , 5
Lcd "INDUCTION"
Locate 2 , 4
Lcd "HEAT SYSTEM"
Waitms 500
Goto Menu

```

```

Menu:
Cls
Do
If Menu = 2 Then
'Locate 1 , 1
'Lcd "      MENU      "
Locate 2 , 2
Lcd " SET PARAMETER "
If C_set = 0 Then
Waitms 300
Cls
Gosub Parameter
End If
Elseif Menu = 3 Then
'Locate 1 , 1
'Lcd "      MENU      "
Locate 2 , 2
Lcd " RUN PROGRAM  "
Waitms 200
If C_set = 0 Then
Waitms 300
Cls
Gosub Run
End If
Pwm1b = 0
End If
If C_menu = 0 Then
Waitms 300
Menu = Menu + 1
If Menu > 3 Then
Menu = 2
End If
End If
Loop

'*****PARAMETER*****
*****

Parameter:
Locate 1 , 3
Lcd "SET VARIABEL"
Locate 2 , 7
Lcd Pck ; " C "
Wait 1
Gosub Puncak
Return

'*****PARAMETER
SUB*****
Puncak:

Gosub Tombol
Writeeprom Pck , 1
Return

```

```

Tombol:
Do
If C_atas = 0 Then
  Waitms 300
  Pck = Pck + 1
  If Pck > 100 Then
    Pck = 15
  End If
Elseif C_bawah = 0 Then
  Waitms 300
  Pck = Pck - 1
  If Pck < 15 Then
    Pck = 100
  End If
End If

Locate 2 , 7
Lcd Pck ; " C "
Loop Until C_set = 0
Wait 1
Cls
Return

'*****RUN
PROGRAM*****

Run:
Lad_kuning = 1
Locate 1 , 1
Lcd " HEATING PROSES "
Do
Gosub Temperatur
Locate 2 , 1
Lcd "SV " ; Pck ; " C" ; " PV " ; Suhu ; " C" ;
Waitms 500
Jmk = 0
If Suhu >= Pck Then
Lad_merah = 1
Pwmlb = 0
Elseif Suhu < Pck Then
Lad_merah = 0
Pwmlb = 500
End If
Loop Until C_set = 0
Lad_kuning = 0
Cls
Locate 1 , 1
Lcd " STOP HEATING "
Wait 1
Cls
Return

'*****TEMPERATUR*****
*****

```

```

Temperatur:
For Index = 1 To 50
    Adc1(index) = Getadc(0)
    Ukur = Ukur + Adc1(index)
Next Index

    Ukur = Ukur / 50
    Volt_sh = Ukur * 0.0048876
    Suhu = Volt_sh * 100
Return

```

```

'Temperatur:
'Readeeprom Volt_sh , 10
'Volt_sh2 = Volt_sh
'For Index = 1 To 50
'    Adc1(index) = Getadc(0)
'    Ukur = Ukur + Adc1(index)
'Next Index
'Wait 1
'    Ukur = Ukur / 50
'    Volt_sh = Ukur * 0.0048
'    Writeeprom Volt_sh , 10
'If Volt_sh2 < Volt_sh Then
'    Suhu = Volt_sh - Volt_sh2
'    If Suhu >= 0.02 Then
'        Jmk = Suhu / 0.02
'        Suhu2 = Suhu2 + Jmk
'    End If
'Elseif Volt_sh2 > Volt_sh Then
'    Suhu = Volt_sh2 - Volt_sh
'    If Suhu >= 0.02 Then
'        Jmk = Suhu / 0.02
'        Suhu2 = Suhu2 - Jmk
'    End If
'End If

'Return

```

## LAMPIRAN 2

### IGBT FGA15N120AND

FGA15N120AND



IGBT

## FGA15N120AND

### General Description

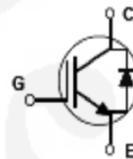
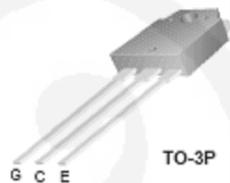
Employing NPT technology, Fairchild's AND series of IGBTs provides low conduction and switching losses. The AND series offers solutions for applications such as induction heating (IH), motor control, general purpose inverters and uninterruptible power supplies (UPS).

### Features

- High speed switching
- Low saturation voltage :  $V_{CE(sat)} = 2.4\text{ V @ } I_C = 15\text{ A}$
- High input impedance
- CO-PAK, IGBT with FRD :  $t_{rr} = 210\text{ ns (typ.)}$

### Applications

Induction Heating, UPS, AC & DC motor controls and general purpose inverters.



### Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Description	FGA15N120AND	Units
$V_{CES}$	Collector-Emitter Voltage	1200	V
$V_{GES}$	Gate-Emitter Voltage	$\pm 20$	V
$I_C$	Collector Current @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	24	A
	Collector Current @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	15	A
$I_{CM(1)}$	Pulsed Collector Current	45	A
$I_F$	Diode Continuous Forward Current @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	15	A
$I_{FM}$	Diode Maximum Forward Current	45	A
$P_D$	Maximum Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	200	W
	Maximum Power Dissipation @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	80	W
$T_J$	Operating Junction Temperature	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
$T_L$	Maximum Lead Temp. for soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	300	$^\circ\text{C}$

Notes :  
(1) Repetitive rating : Pulse width limited by max. junction temperature

### Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$ (IGBT)	Thermal Resistance, Junction-to-Case	--	0.83	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JC}$ (DIODE)	Thermal Resistance, Junction-to-Case	--	2.88	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	--	40	$^\circ\text{C/W}$

**Electrical Characteristics of the IGBT**  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
$BV_{CES}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{GE} = 0V, I_C = 3mA$	1200	--	--	V
$\frac{\Delta BV_{CES}}{\Delta T_J}$	Temperature Coefficient of Breakdown Voltage	$V_{GE} = 0V, I_C = 3mA$	--	0.6	--	V/°C
$I_{CES}$	Collector Cut-Off Current	$V_{CE} = V_{CES}, V_{GE} = 0V$	--	--	3	mA
$I_{GES}$	G-E Leakage Current	$V_{GE} = V_{GES}, V_{CE} = 0V$	--	--	$\pm 100$	nA

**On Characteristics**

$V_{GE(th)}$	G-E Threshold Voltage	$I_C = 15mA, V_{CE} = V_{GE}$	3.5	5.5	7.5	V
$V_{CE(sat)}$	Collector to Emitter Saturation Voltage	$I_C = 15A, V_{GE} = 15V$	--	2.4	3.2	V
		$I_C = 15A, V_{GE} = 15V, T_C = 125^\circ\text{C}$	--	2.9	--	V
		$I_C = 24A, V_{GE} = 15V$	--	3.0	--	V

**Dynamic Characteristics**

$C_{ies}$	Input Capacitance	$V_{CE} = 30V, V_{GE} = 0V, f = 1MHz$	--	1150	--	pF
$C_{oes}$	Output Capacitance		--	120	--	pF
$C_{res}$	Reverse Transfer Capacitance		--	56	--	pF

**Switching Characteristics**

$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	$V_{CC} = 600V, I_C = 15A, R_G = 20\Omega, V_{GE} = 15V, \text{Inductive Load}, T_C = 25^\circ\text{C}$	--	90	--	ns
$t_r$	Rise Time		--	70	--	ns
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time		--	310	--	ns
$t_f$	Fall Time		--	80	120	ns
$E_{on}$	Turn-On Switching Loss		--	3.27	4.9	mJ
$E_{off}$	Turn-Off Switching Loss		--	0.6	0.9	mJ
$E_{is}$	Total Switching Loss	--	3.88	5.8	mJ	
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	$V_{CC} = 600V, I_C = 15A, R_G = 20\Omega, V_{GE} = 15V, \text{Inductive Load}, T_C = 125^\circ\text{C}$	--	80	--	ns
$t_r$	Rise Time		--	60	--	ns
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time		--	310	--	ns
$t_f$	Fall Time		--	50	--	ns
$E_{on}$	Turn-On Switching Loss		--	3.41	--	mJ
$E_{off}$	Turn-Off Switching Loss		--	0.84	--	mJ
$E_{is}$	Total Switching Loss	--	4.25	--	mJ	
$Q_g$	Total Gate Charge	$V_{CE} = 600V, I_C = 15A, V_{GE} = 15V$	--	120	180	nC
$Q_{ge}$	Gate-Emitter Charge		--	9	14	nC
$Q_{gc}$	Gate-Collector Charge		--	63	95	nC
$L_e$	Internal Emitter Inductance	Measured 5mm from PKG	--	14	--	nH

**Electrical Characteristics of DIODE**  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units	
$V_{FM}$	Diode Forward Voltage	$I_F = 15A$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	--	1.7	2.7	V
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	--	1.8	--	
$t_{rr}$	Diode Reverse Recovery Time	$I_F = 15A$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	--	210	330	ns
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	--	280	--	
$I_{rr}$	Diode Peak Reverse Recovery Current	$dI/dt = 200A/\mu s$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	--	27	40	A
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	--	31	--	
$Q_{rr}$	Diode Reverse Recovery Charge	$dI/dt = 200A/\mu s$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	--	2835	8800	nC
			$T_C = 125^\circ\text{C}$	--	4340	--	

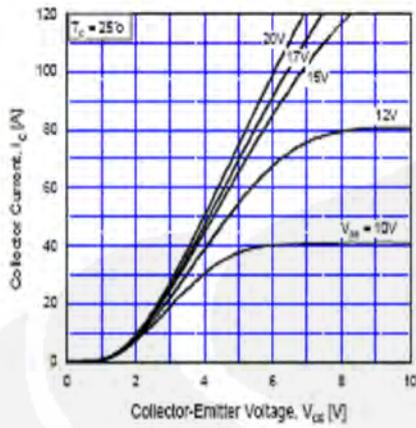


Fig 1. Typical Output Characteristics

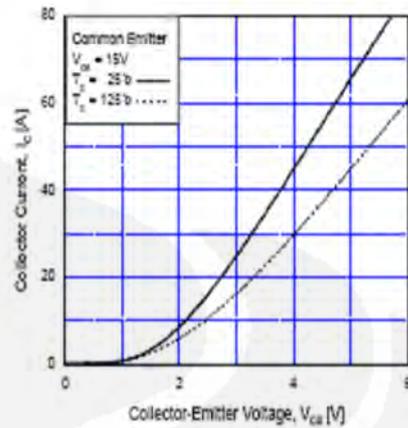


Fig 2. Typical Saturation Voltage Characteristics

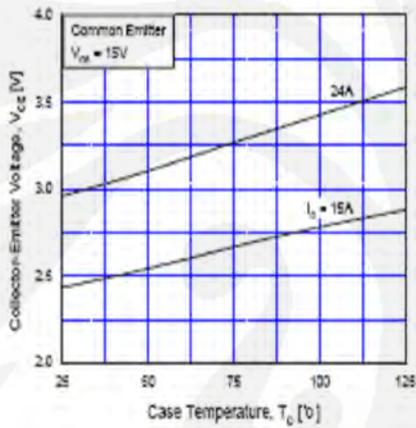


Fig 3. Saturation Voltage vs. Case Temperature at Variant Current Level

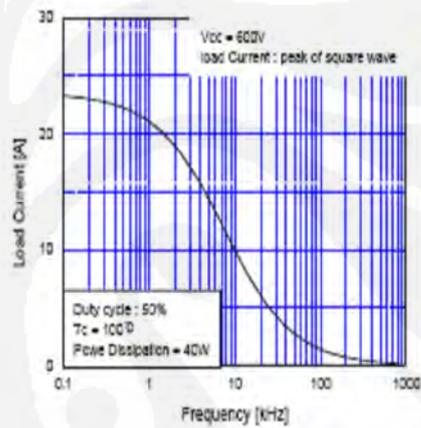


Fig 4. Load Current vs. Frequency

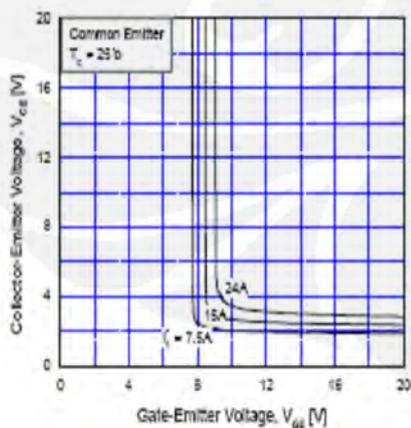


Fig 5. Saturation Voltage vs.  $V_{GE}$

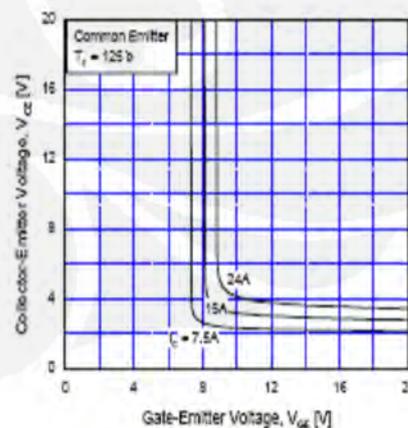


Fig 6. Saturation Voltage vs.  $V_{GE}$

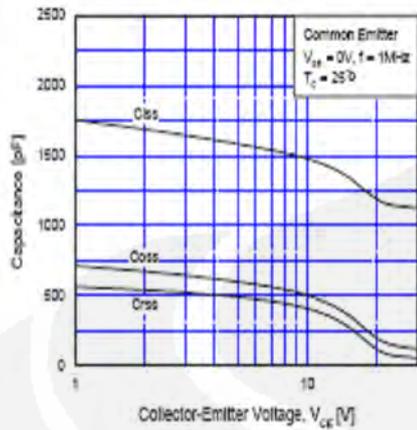


Fig 7. Capacitance Characteristics

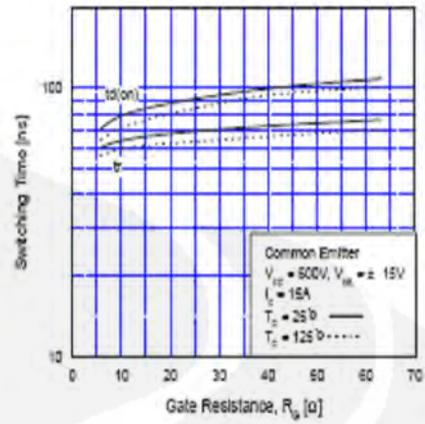


Fig 8. Turn-On Characteristics vs. Gate Resistance

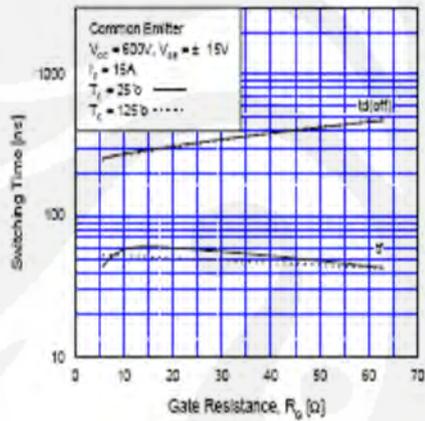


Fig 9. Turn-Off Characteristics vs. Gate Resistance

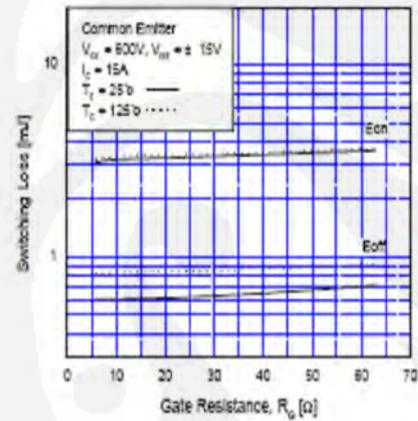


Fig 10. Switching Loss vs. Gate Resistance

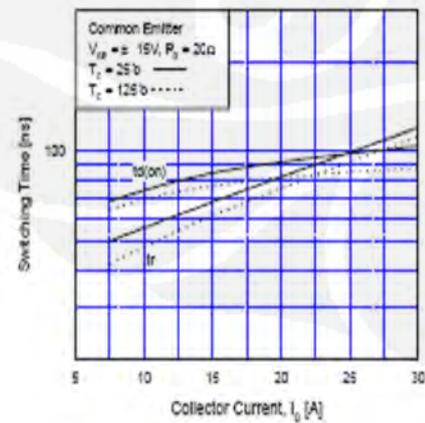


Fig 11. Turn-On Characteristics vs. Collector Current

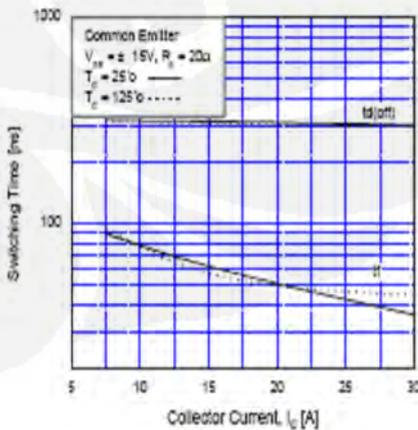


Fig 12. Turn-Off Characteristics vs. Collector Current

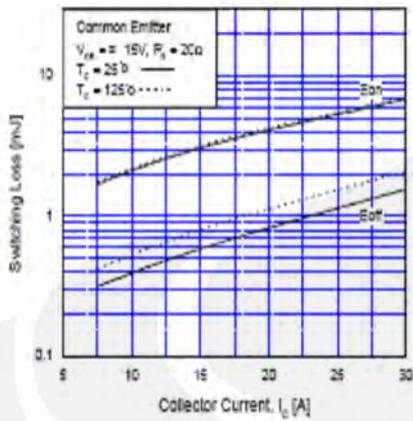


Fig 13. Switching Loss vs. Collector Current

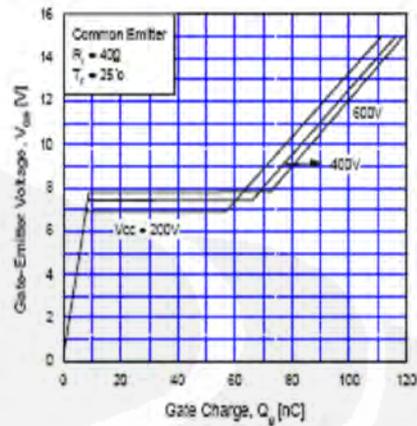


Fig 14. Gate Charge Characteristics

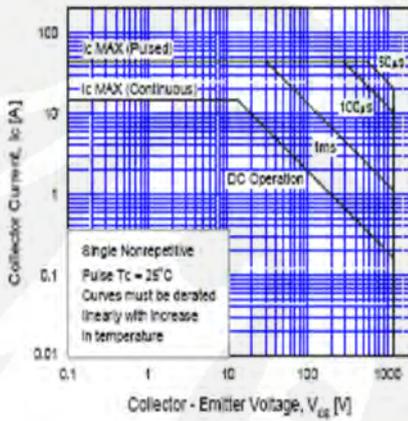


Fig 15. SOA Characteristics

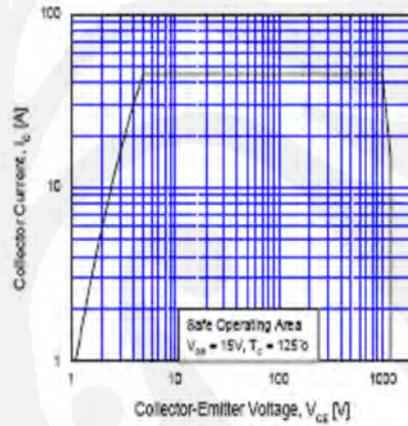


Fig 16. Turn-Off SOA

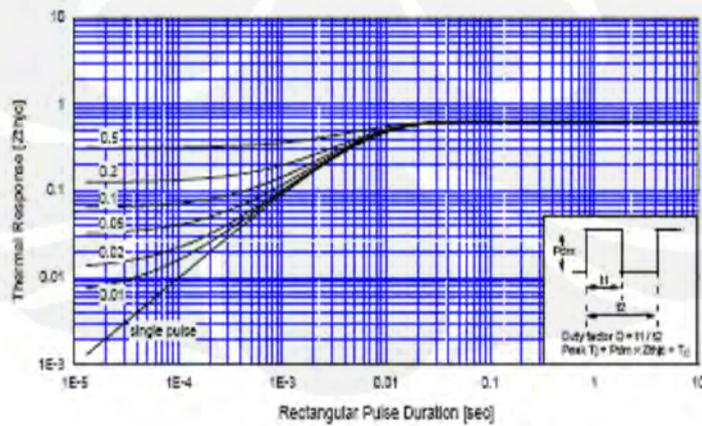
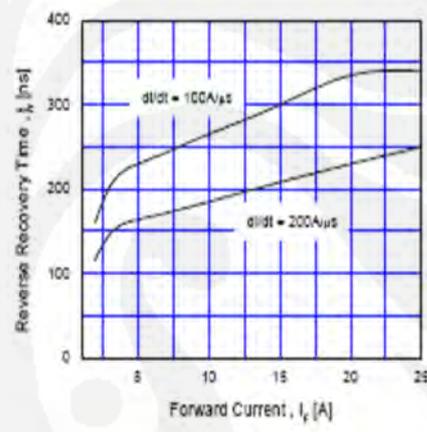
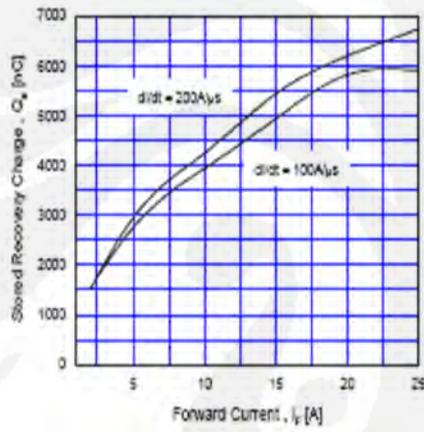
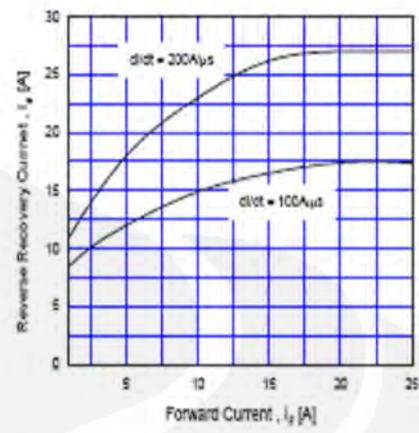
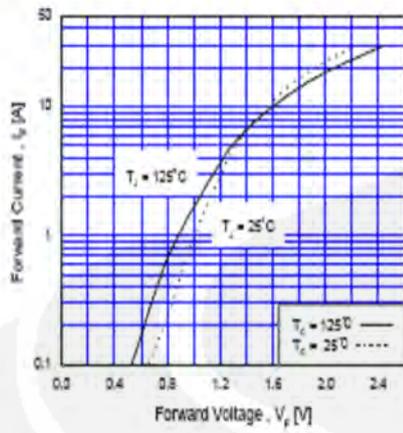


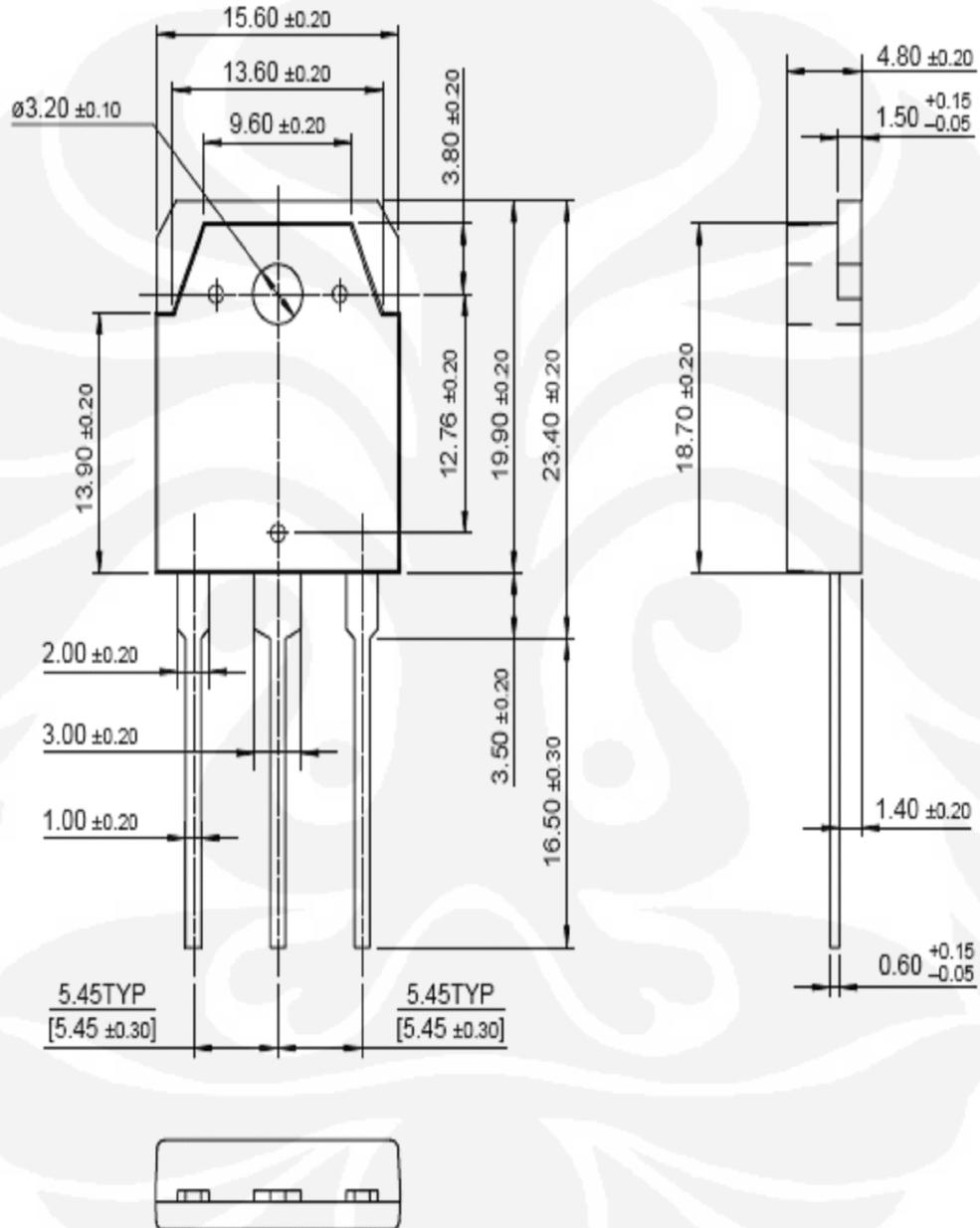
Fig 17. Transient Thermal Impedance of IGBT



Package Dimension

FGA15N120AND

TO-3P (FS PKG CODE )



Dimensions in Millimeters

## TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	FACT Quiet Series™	LittleFET™	Power247™	SuperSOT™-6
ActiveArray™	FAST®	MICROCOUPLER™	PowerTrench®	SuperSOT™-8
Bottomless™	FASTr™	MicroFET™	QFET®	SyncFET™
CoolFET™	FRFET™	MicroPak™	QS™	TinyLogic®
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	MICROWIRE™	QT Optoelectronics™	TINYOPTO™
DOME™	GTO™	MSX™	Quiet Series™	TruTranslation™
EcoSPARK™	HiSeC™	MSXPro™	RapidConfigure™	UHC™
E <sup>2</sup> CMOS™	PC™	OCX™	RapidConnect™	UltraFET®
EnSigna™	ImpliedDisconnect™	OCXPro™	SILENT SWITCHER®	VCX™
FACT™	ISOPLANAR™	OPTOLOGIC®	SMART START™	
Across the board. Around the world.™		OPTOPLANAR™	SPM™	
The Power Franchise™		PACMAN™	Stealth™	
Programmable Active Droop™		POP™	SuperSOT™-3	

## DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

## LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

## PRODUCT STATUS DEFINITIONS

### Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



## LAMPIRAN 3

### IC SG3524 Regulator Modulasi Lebar Pulsa

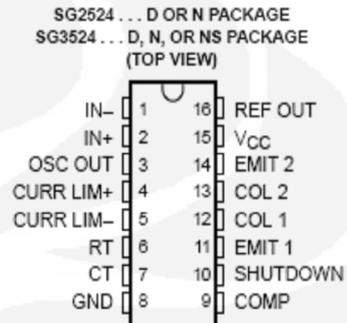
#### SG2524, SG3524 REGULATING PULSE-WIDTH MODULATORS

SLVS077D – APRIL 1977 – REVISED FEBRUARY 2003

- Complete Pulse-Width Modulation (PWM) Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for Single-Ended or Push-Pull Applications
- Low Standby Current . . . 8 mA Typ
- Interchangeable With Industry Standard SG2524 and SG3524

#### description/ordering information

The SG2524 and SG3524 incorporate all the functions required in the construction of a regulating power supply, inverter, or switching regulator on a single chip. They also can be used as the control element for high-power-output applications. The SG2524 and SG3524 were designed for switching regulators of either polarity, transformer-coupled dc-to-dc converters, transformerless voltage doublers, and polarity-converter applications employing fixed-frequency, pulse-width modulation (PWM) techniques. The complementary output allows either single-ended or push-pull application. Each device includes an on-chip regulator, error amplifier, programmable oscillator, pulse-steering flip-flop, two uncommitted pass transistors, a high-gain comparator, and current-limiting and shutdown circuitry.



#### ORDERING INFORMATION

T <sub>A</sub>	INPUT REGULATION MAX (mV)	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	30	PDIP (N)	Tube of 25	SG3524N	SG3524N
		SOIC (D)	Tube of 40	SG3524D	SG3524
			Reel of 2500	SG3524DR	
-25°C to 85°C	20	SOP (NS)	Reel of 2000	SG3524NSR	SG3524
		PDIP (N)	Tube of 25	SG2524N	SG2524N
			SOIC (D)	Tube of 40	SG2524D
Reel of 2500	SG2524DR				

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).

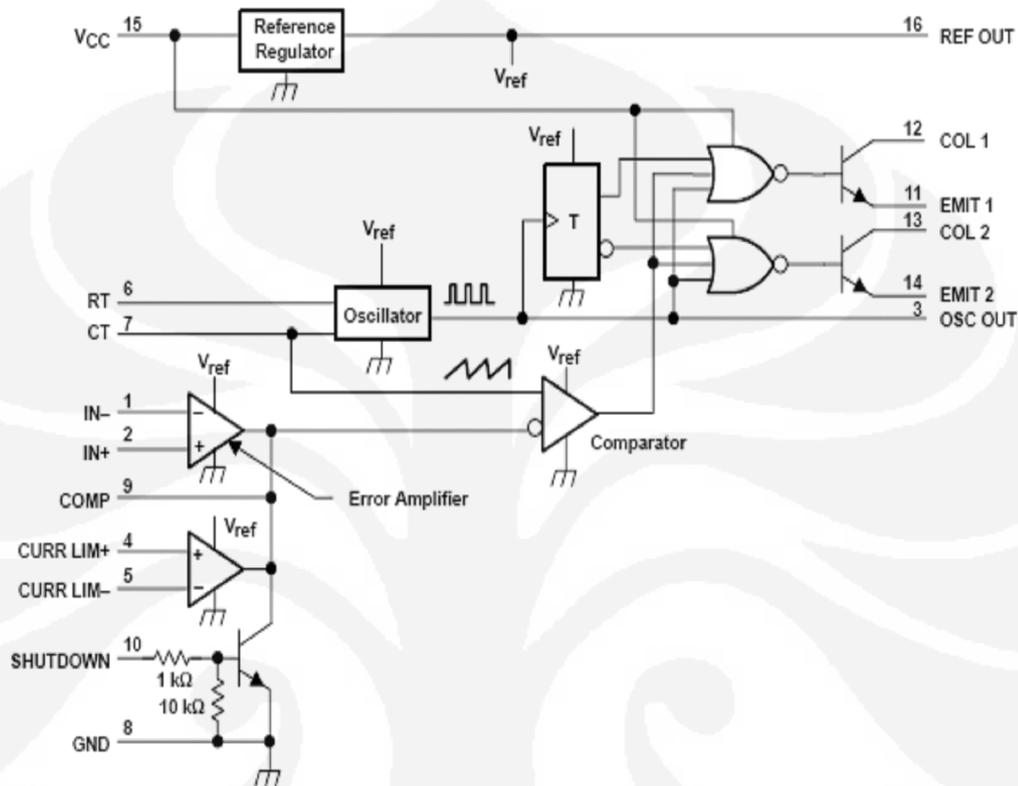


Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

# SG2524, SG3524 REGULATING PULSE-WIDTH MODULATORS

SLVS077D – APRIL 1977 – REVISED FEBRUARY 2003

## functional block diagram



NOTE A: Resistor values shown are nominal.

## absolute maximum ratings over operating free-air temperature (unless otherwise noted)<sup>†</sup>

Supply voltage, $V_{CC}$ (see Notes 1 and 2)	40 V
Collector output current, $I_{CC}$	100 mA
Reference output current, $I_{O(ref)}$	50 mA
Current through CT terminal	-5 mA
Operating virtual junction temperature, $T_J$	150°C
Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Notes 3 and 4):	
D package	73°C/W
N package	67°C/W
NS package	64°C/W
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C
Storage temperature range, $T_{stg}$	-65°C to 150°C

<sup>†</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. All voltage values are with respect to network ground terminal.

2. The reference regulator may be bypassed for operation from a fixed 5-V supply by connecting the  $V_{CC}$  and reference output (REF OUT) pin both to the supply voltage. In this configuration, the maximum supply voltage is 8 V.

3. Maximum power dissipation is a function of  $T_{J(max)}$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_{J(max)} - T_A)/\theta_{JA}$ . Operation at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can impact reliability.

4. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

## SG2524, SG3524 REGULATING PULSE-WIDTH MODULATORS

SLVS077D – APRIL 1977 – REVISED FEBRUARY 2003

### recommended operating conditions

		MIN	MAX	UNIT	
$V_{CC}$	Supply voltage	8	40	V	
	Reference output current	0	50	mA	
	Current through CT terminal	-0.03	-2	mA	
$R_T$	Timing resistor	1.8	100	k $\Omega$	
$C_T$	Timing capacitor	0.001	0.1	$\mu$ F	
$T_A$	Operating free-air temperature	SG2524	-25	85	$^{\circ}$ C
		SG3524	0	70	

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 20$  V,  $f = 20$  kHz (unless otherwise noted)

### reference section

PARAMETER	TEST CONDITION <sup>†</sup>	SG2524			SG3524			UNIT
		MIN	TYP <sup>‡</sup>	MAX	MIN	TYP <sup>‡</sup>	MAX	
Output voltage		4.8	5	5.2	4.8	5	5.4	V
Input regulation	$V_{CC} = 8$ V to 40 V	10 20			10 30			mV
Ripple rejection	$f = 120$ Hz	66			66			dB
Output regulation	$I_O = 0$ mA to 20 mA	20 50			20 50			mV
Output voltage change with temperature	$T_A = \text{MIN to MAX}$	0.3% 1%			0.3% 1%			
Short-circuit output current <sup>§</sup>	$V_{ref} = 0$	100			100			mA

<sup>†</sup> For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

<sup>‡</sup> All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^{\circ}$ C

<sup>§</sup> Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean, as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

### oscillator section

PARAMETER		TEST CONDITION <sup>†</sup>	MIN	TYP <sup>‡</sup>	MAX	UNIT
$f_{osc}$	Oscillator frequency	$C_T = 0.001$ $\mu$ F, $R_T = 2$ k $\Omega$	450			kHz
Standard deviation of frequency <sup>§</sup>		All values of voltage, temperature, resistance, and capacitance constant	5%			
$\Delta f_{osc}$	Frequency change with voltage	$V_{CC} = 8$ V to 40 V, $T_A = 25^{\circ}$ C	1%			
	Frequency change with temperature	$T_A = \text{MIN to MAX}$	2%			
Output amplitude at OSC OUT		$T_A = 25^{\circ}$ C	3.5			V
$t_w$	Output pulse duration (width) at OSC OUT	$C_T = 0.01$ $\mu$ F, $T_A = 25^{\circ}$ C	0.5			$\mu$ s

<sup>†</sup> For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

<sup>‡</sup> All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^{\circ}$ C

<sup>§</sup> Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean, as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

## SG2524, SG3524 REGULATING PULSE-WIDTH MODULATORS

SLVS077D – APRIL 1977 – REVISED FEBRUARY 2003

### error amplifier section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	SG2524			SG3524			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	MIN	TYP‡	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	$V_{IC} = 2.5\text{ V}$	0.5	5		2	10		mV
$I_{IB}$ Input bias current	$V_{IC} = 2.5\text{ V}$		2	10		2	10	$\mu\text{A}$
Open-loop voltage amplification		72	80		60	80		dB
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range	$T_A = 25^\circ\text{C}$	1.8 to 3.4			1.8 to 3.4			V
CMMR Common-mode rejection ratio			70			70		dB
$B_1$ Unity-gain bandwidth			3			3		MHz
Output swing	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.5		3.8	0.5		3.8	V

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### output section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
$V_{(BR)CE}$ Collector-emitter breakdown voltage		40			V
Collector off-state current	$V_{CE} = 40\text{ V}$		0.01	50	$\mu\text{A}$
$V_{sat}$ Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 50\text{ mA}$		1	2	V
$V_O$ Emitter output voltage	$V_C = 20\text{ V}$ , $I_E = -250\ \mu\text{A}$	17	18		V
$t_r$ Turn-off voltage rise time	$R_C = 2\text{ k}\Omega$		0.2		$\mu\text{s}$
$t_f$ Turn-on voltage fall time	$R_C = 2\text{ k}\Omega$		0.1		$\mu\text{s}$

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### comparator section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
Maximum duty cycle, each output		45%			
$V_{IT}$ Input threshold voltage at COMP	Zero duty cycle		1		V
	Maximum duty cycle		3.5		
$I_{IB}$ Input bias current			-1		$\mu\text{A}$

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### current limiting section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
$V_I$ Input voltage range (either input)		-1 to 1			V
$V_{(SENSE)}$ Sense voltage at $T_A = 25^\circ\text{C}$	$V_{(IN+)} - V_{(IN-)} \geq 50\text{ mV}$ , $V_{(COMP)} = 2\text{ V}$	175	200	225	mV
Temperature coefficient of sense voltage				0.2	

‡ All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### total device

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
$I_{st}$ Standby current	$V_{CC} = 40\text{ V}$ , $I_{N-}$ , CURR LIM+, $C_T$ , GND, COMP, EMIT 1, EMIT 2 grounded, $I_{N+}$ at 2 V, All other inputs and outputs open		8	10	$\text{mA}$

‡ All typical values, except for temperature coefficients, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

# SG2524, SG3524 REGULATING PULSE-WIDTH MODULATORS

SLVS077D – APRIL 1977 – REVISED FEBRUARY 2003

## PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

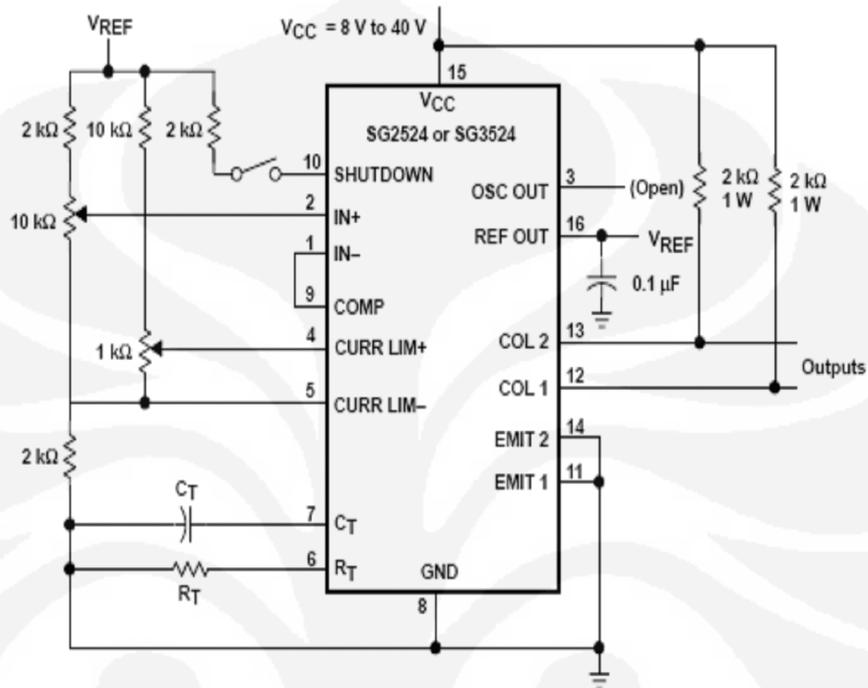


Figure 1. General Test Circuit

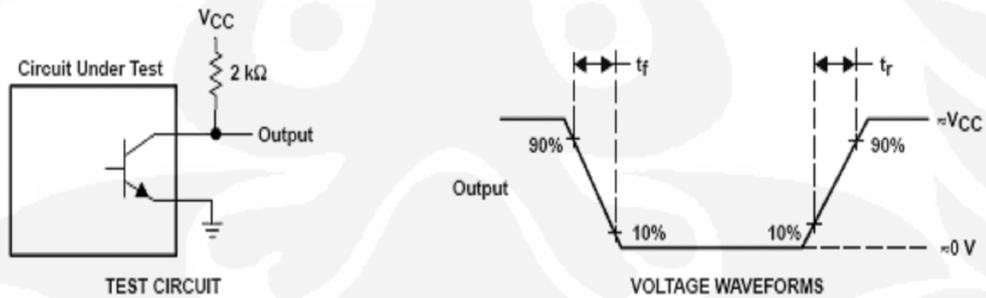


Figure 2. Switching Times