

## **Analisa Kontrol Daya Induction Furnace Pada Industri Peleburan Logam**

Oleh :

<sup>1</sup>Machrus Ali, <sup>2</sup>Dwi Ajiatmo, <sup>3</sup>Hidayatul Nurohmah

<sup>1,2,3</sup> Teknik Elektro, Universitas Darul Ulum, Jombang

<sup>1</sup>[machrus7@gmail.com](mailto:machrus7@gmail.com), <sup>2</sup>[ajiatmo@gmail.com](mailto:ajiatmo@gmail.com), <sup>3</sup>[hidayatul.nurohmah@gmail.com](mailto:hidayatul.nurohmah@gmail.com)

### **ABSTRAK**

*Induction Furnace adalah teknologi yang diterapkan dengan memanfaatkan Arus Eddy yang dihasilkan oleh medan elektromagnetik. Rugi-rugi akibat Arus Eddy yang menghasilkan disipasi panas inilah kemudian dimanfaatkan untuk dapat melebur logam. Penggunaan teknologi ini adalah sistem induksi, yaitu coil yang diberi tegangan AC dengan frekuensi tertentu, namun sistem ini juga melibatkan konversi daya dari AC menjadi DC dan sebaliknya serta sistem kontrol dan pengamanan. Permasalahan bagaimana prinsip dasar dari sistem induksi dalam pembangkitan panas untuk proses peleburan logam, bagaimana proses konversi daya listrik yang terjadi dalam sistem induktion dan proses kontrol daya listrik untuk membangkitkan sumber daya listrik induksi.*

*Pemilihan Thyristor atau SCR dalam penyearah DC disebabkan oleh pertimbangan adanya ketepatan terjadinya konduksi untuk terjadinya penyearahan. Pengaturan penyalan pada gate yang mempengaruhi waktu konduksi pada SCR menyebabkan keluaran yang lebih optimal dalam penyearahan. Selain itu dengan sifatnya yang memiliki gate sebagai pemicu konduksi, SCR memungkinkan adanya kontrol terintegrasi baik sebagai pengaman komponen atau dalam kaitannya dengan rangkaian lain. Pemilihan Thyristor sebagai komponen utama inverter, adalah disebabkan efisiensi kerjanya yang mencapai 90%, frekuensi kerjanya yang fleksibel 100Hz-10kHz, juga dayanya yang mencapai 10 MW. Pembangkitan daya induksi elektromagnetik akan menghasilkan arus beban yang tertinggal 900 pada fasa sehingga diperlukan kompensasi dengan menggunakan kapasitor yang harus memiliki reaktansi kapasitif yang hampir sama dengan reaktansi induktif pada coil. Dengan demikian terjadi frekuensi resonansi yang bukan saja mampu menahan laju arus akibat reaktansi induktif tapi juga memperbaiki faktor daya.*

*Kata kunci : Kontrol Daya, Induction Furnace*

### **1. PENDAHULUAN**

Penggunaan energi listrik dalam kehidupan manusia menjadi bagian yang tak dapat lagi dipisahkan. Sejak konversi energi listrik ditemukan manusia berlomba-lomba untuk menciptakan perangkat penunjang hidup dengan menggunakan energi listrik. Efisiensi dalam segi operasional maupun biaya menjadi pertimbangan utama untuk menggunakan energi listrik ini. Selain itu dalam beberapa studi dan analisa energi listrik diklaim sebagai sumber energi yang paling ramah terhadap lingkungan. Sehingga tidak heran jika kemudian energi listrik kemudian menjadi tulang punggung utama dalam pemenuhan kebutuhan akan energi dalam

kehidupan sehari-hari. Bukan hanya untuk kebutuhan konsumtif saja tetapi juga kebutuhan yang bersifat produktif.

Salah satu revolusi penggunaan energi listrik yang dinilai cukup memberi dampak yang signifikan dalam kebutuhan yang produktif adalah dalam industri peleburan dan pengecoran logam. Penggunaan energi listrik yang diaplikasikan melalui sistem induksi bukan saja memberikan kemudahan dalam proses produksi, tetapi juga keramahan terhadap lingkungan membuat sistem ini membuat perusahaan yang bergerak di bidang foundry/ pengecoran logam beralih menggunakan teknologi yang sekarang ini lebih dikenal sebagai *induction furnace*.

Penggunaan Energi Listrik dalam Industri peleburan logam yang dimaksud dalam pengajuan tugas akhir ini adalah perangkat yang digunakan untuk meleburkan atau mencairkan logam yang akan dituang dalam cetakan-cetakan. Meski inti dari penggunaan teknologi ini adalah sistem induksi, yaitu coil yang diberi tegangan AC dengan frekuensi tertentu, namun sistem ini juga melibatkan konversi daya dari AC menjadi DC dan sebaliknya serta sistem kontrol dan pengamanan. Sehingga dalam perencanaannya maupun nanti dalam troubleshooting perlu diketahui prinsip dasar dari teknologi ini. Sehingga dengan analisa dan kajian terhadap penggunaan teknologi *induction furnace* ini, mampu memberikan pemahaman pada para praktisi sekaligus menjadi inspirasi bagi pengembangan teknologi ini di masa-masa yang akan datang. Permasalahan Bagaimana prinsip dasar dari sistem induksi dalam pembangkitan panas untuk proses peleburan logam ?. Bagaimana proses konversi daya listrik yang terjadi dalam sistem induktion dan proses kontrol daya listrik untuk membangkitkan sumber daya listrik induksi ?. Batasan dalam penelitian ini adalah analisa kelistrikan yang berhubungan sistem induksi, konversi daya listrik, dan sistem kontrol.

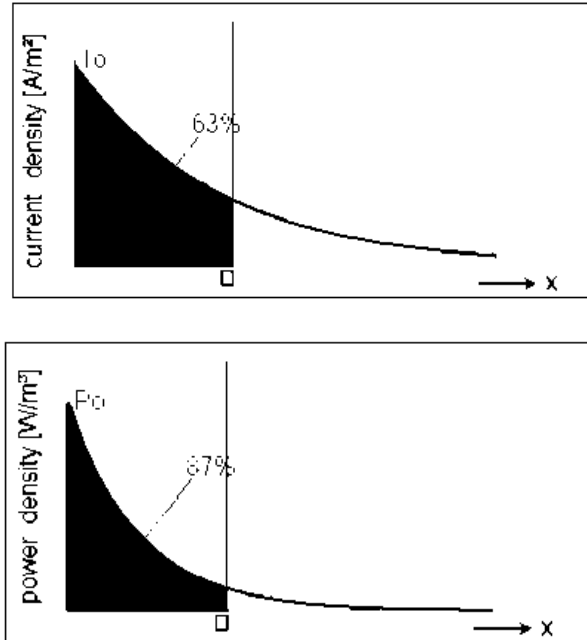
## **2. KAJIAN LITERATUR**

### **2.1. Konversi Energi Pada Coil Induction Furnace**

Sebagaimana prinsip Induksi Elektromagnetik yang telah tersebut di atas. Maka pada pada Coil Induction Furnace yang mendapatkan catu daya bolak-balik terjadi Pembangkitan Panas oleh Induksi Elektromagnetik dengan kronologis berikut :

1. Arus pada kumparan membangkitkan flux magnet
2. Flux magnet menembus bahan metal yang akan dipanaskan.
3. Timbul arus pusar di bahan metal , terlahi losses eddy current yang berbanding lurus dengan kwadrat frekuensi fluksi.
4. Terjadi proses pelelehan (melting) metal, dan aliran konveksi dalam metal yang mencair.

Pada proses tranfer energy pada material yang akan dilebur terdapat ketidak seragaman parameter salah satunya adalah Penetration Depth (Kedalaman Penetrasi). Sebagai karakteristik dasar dari arus bolak-balik yang cenderung terkonsentrasi pada bagian luar konduktor, yang menimbulkan efek kulit (skin effect). Begitu juga pada Arus Eddy yang menginduksi material pada koil induction furnace cenderung berkurang pada bagian pusat. Hal ini yang menimbulkan adanya Faktor Kedalaman Penetrasi yang sangat dipengaruhi oleh jenis material. Kedalaman Penetrasi sendiri didefinisikan sebagai tebal lapisan yang diukur dari bagian terluar pada 87% daya yang dibentuk.



Gambar 1 Faktor Kedalaman Penetrasi

Kedalaman Penetrasi ini dapat dianalisa dengan menggunakan persamaan Maxwell. Dengan mengasumsikan bahwa dimensi beban adalah silindris yang diameternya lebih besar dari Kedalaman Penetrasi itu sendiri ( $\delta$ ). Persamaan itu adalah :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad [m] \quad .(1)$$

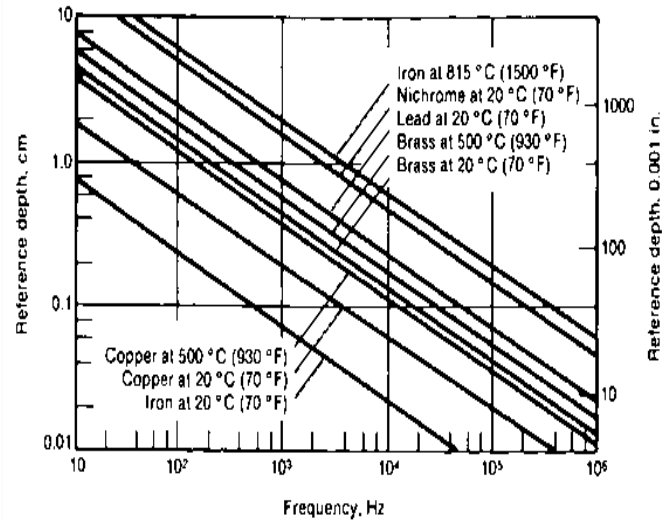
- $\mu$  : permeabilitas magnetik (H/m)
- $f$  : frekuensi (Hz)
- $\rho$  : resistivity ( $\Omega \cdot m$ )

Pada proses pentransferan energy elektrik yang terjadi pada induction furnace sendiri tidak dapat didefinisikan dengan persamaan disipasi daya biasa. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa daya pada Induction Furnace terjadi karena Efek Joule dan induksi oleh Arus Eddy yang mengakibatkan ketidak seragaman pada distribusi arus. Sehingga daya pada Induction Furnace sendiri dapat didefinisikan dengan :

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f} \cdot C \cdot F \quad .(2)$$

- $d$  : diameter dari silinder (m)
- $h$  : ketebalan silinder (m)
- $H$  : Intensitas Medan Magnet (A/m)
- $\rho$  : resistivity ( $\Omega/m$ )
- $\mu_r$  : permeabilitas relatif
- $\mu_0$  : permeabilitas magnetik pada udara vakum ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)
- $C$  : faktor kopling
- $F$  : faktor transmisi daya

Dari dua persamaan sebelumnya dapat diketahui bahwa kedalaman penetrasi tidak saja dipengaruhi oleh jenis material logam tetapi juga oleh frekuensi. Ketergantungan pada frekuensi (Gambar 2) inilah yang memberi peluang adanya sistem kontrol pengaturan tentunya melalui variable frekuensi untuk kedalaman penetrasi.



Gambar 2 Diagram Perbandingan Kedalaman Penetrasi dan Frekuensi

Tabel 1. Penguatan Kedalaman Penetrasi Pada Beberapa Logam

$\delta$ in [mm]	Steel 20 °C	Steel 20 °C	Copper 20 °C	Copper 900 °C	Graphite 20 °C
$\rho$ [ $\mu\Omega \cdot m$ ] →	0.16	0.16	0.017	0.086	10
$\mu$ [-] →	40	100	1	1	1
Frequency ↓					
50 Hz	4.50	2.85	9.31	20.87	225.08
100 Hz	3.18	2.01	6.58	14.76	159.15
1 kHz	1.01	0.64	2.08	4.67	50.33
10 kHz	0.32	0.20	0.66	1.48	15.92
100 kHz	0.10	0.06	0.21	0.47	5.03
1 MHz	0.03	0.02	0.07	0.15	1.59

Dengan derivasi persamaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa kedalaman penetrasi berbanding terbalik dengan akar dari  $r$  (permiabilitas magnetik). Pada material non magnetis seperti tembaga dan alumunium memiliki permiabilitas sama dengan 1. Sedangkan material ferromagnetik memiliki permiabilitas yang jauh lebih tinggi sehingga lebih eksplisit menunjukkan tanda effect skin

## 2.2. Parameter Geometris Induction Furnace

Selain dipengaruhi parameter-parameter kelistrikan terutama yang berhubungan dengan induksi elektromagnetik. Induction Furnace dalam kerjanya juga dipengaruhi oleh parameter geometrik dapat dipisahkan. Pada desain perencanaannya parameter geometris tidak dapat dipisahkan dari parameter elektrik, karena akan berpengaruh pada efisiensi dan kapasitas

Induction Furnace itu sendiri. Parameter-parameter geometris yang dimaksud adalah sebagai berikut. (Bala, K.C. *Design Analysis of Electric Induction Furnace*, Hal 4)

Dimensi tungku atau *crucible lining*, yang akan menentukan kapasitas furnace (volume furnace), pada perbandingan antara tinggi tungku dan volume tungku dengan nilai rasio sebagai berikut berikut.

$$\frac{H_m}{D_c} = (1.6 - 2.0) \quad .(3)$$

Di mana ;

$H_m$  = Ketinggian tungku (m)

$D_c$  = Diameter Tungku/ *crucible lining* (m)

Volume metal charge (material yang dilebur) sendiri dinyatakan dalam persamaan :

$$V_m = \frac{4\pi}{4}(d_m)^2 H_m. \quad .(4)$$

Dimana ;

$d_m$  = diameter material yang dilebur =  $D_c$ .

Refractory Lining atau lapisan pemisah non konduktif yang memisahkan antar koil pembentuk tungku dan material yang dilebur. Ketebalannya ditentukan oleh persamaan :

$$B = 0.084 \sqrt{T} \quad .(5)$$

Dengan T adalah kapasitas dalam Ton.

Sementara itu diameter dalam dari induktor dapat dikalkulasikan dengan persamaan :

$$D_{in} = D_c + 2 (B_r + B_{ins}) . \quad .(6)$$

$B_r$  = Ketebalan lapisan tungku .

$B_{ins}$  = Ketebalan lapisan insulator.

( $B_{ins}$  sedemikian hingga haruslah memenuhi persyaratan  $5 \leq B_{ins} \leq 6$  (mm))

Ketebalan Induktor furnace adalah ;

$$H_{ins} = (1.1-1.2)H_m . \quad .(7)$$

Ketebalan furnace dari bagian terbawah tungku sampai pada bagian penuangan dari tungku adalah :

$$H_f = H_m + h_s + b_t . \quad .(8)$$

Dengan  $h_s$  adalah ketebalan kerak bentukan (m) dan  $b_t$  ketebalan lapisan pelindung bagian bawah tungku ( $b_t = 25.5$  mm untuk tiap 10 kg beban.

Ketebalan kerak dapat diperhitungkan dengan :

$$h_s = 4V_s / (\pi(d_m)^2) . \quad .(9)$$

dengan  $V_s$  = Volume dari kerak bentukan diasumsikan sbagai 8% dari total material yang dilebur. Ketinggian dari kutub induktor adalah :

$$H_p = H_{in} + 2T_f \quad .(10)$$

Dengan  $T_f$  ketebalan kuping diasumsikan sekitar 3mm.

### 2.3. Parameter Pembangkitan Energi Panas

Teori tentang pembangkitan panas (Ilori 1991), memberikan ilustrasi persamaan bahwa selama periode pemanasan peleburan logam adalah :

$$Q_{th} = Q_m + Q_{sh} + Q_s + Q_{en} - Q_{ex} . \quad .(11)$$

dengan,  $Q_m$  = Jumlah energi panas untuk mencairkan per 10kg material (J).

$Q_{sh}$  = Jumlah energi panas untuk mencapai energi panas titik lebur (J).

$Q_s$  = Jumlah energi panas untuk melepas kerak pada loham material (J).

$Q_{en}$  = Jumlah energi panas untuk terjadinya proses endotermik (J).

$Q_{ex}$  = Jumlah energi yang dilepaskan untuk dalam proses eksotermis (J).

Pada umumnya jumlah energi dalam proses eksotermis dan endotermis cenderung sama sehingga ;

$$Q_{th} = Q_m + Q_{sh} + Q_s \quad .(12)$$

dan nilai

$$Q_m = MC (\theta_1 + \theta_0) + L p.. \quad .(13)$$

dengan ;

M = Massa material ( kg)

C = Koefisien pemanasan material (misal untuk aluminum, C = 1100J/kg K);

$L_{pt}$  = Jumlah energi panas untuk menyempurnakan fase transformasi'

$\theta_1$  = Temperatur dimana material mencair (°C).

$\theta_0$  = Temperatur ruang 25°C.

Serupa dengan persamaan di atas adalah :

$$Q_{sh} = MC_m \theta_{sh} . \quad .(14)$$

$C_m$  = Rata-rata kapasitas panas pada material yang lebur (kJ/kg K),

$\theta_{sh}$  = 40°C.

$$Q_s = K_s G_s . \quad .(15)$$

Dengan ,  $K_s$  = jumlah kerak terbentuk (kg), diaumsikan 8% dari kapasitas furnace,  $G_s$  =Energi panas pada kerak (kJ/kg).

Total energi panas yang diinduksikan (Hammond, 1978) pada material yang dilebur berdasar Arus Eddy ( $Q_{ec}$ ) yang mengalirinya adalah :

$$Q_{ec} = (\pi^3 f^2 H_m B_{maz}^2 d_m^2) / 8\rho \quad .(16)$$

Dengan  $B_{max}$  = maksimum densitas fluks (H),  $\rho$  adalah resistivitas dari material yang dilebur ( $\Omega m$ )

Sehingga :

$$B_{max} = \sqrt{\frac{8\rho}{\pi^3 f^2 d m^4 H m} Q_{ec}} \quad (17)$$

$$Q_{ec} = Q_{th}/t$$

dengan, t = adalah waktu dalam detik untuk mencapai fluks maksimum.

Sedangkan arus densitas yang merupakan arus yang dipengaruhi oleh kepadatan induktor yang diperbolehkan adalah :

$$J = I / A_t.. \quad (18)$$

(Area J dari 20 – 40 A/mm<sup>2</sup>), I adalah arus pada induktor dalam Ampere, dan  $A_t$  adalah luasan penampang induktor merupakan selisih dari luas penampang total dikurangi luas lubang konduktor furnace ditentukan dengan persamaan

Jumlah lilitan induktor yang membentuk tungku furnace ditentukan :

$$B_{max} = (\mu_r \mu_0 N I) / L. \quad .(19)$$

$$N = (B_{max} L) / (\mu_0 I). \quad (20)$$

Dengan  $L$  = panjang induktor/coil dalam meter,  $\mu_0$  adalah permeabilitas di ruang bebas bernilai  $4\pi * 10^{-7}$  H/m,  $\mu_r$  merupakan permeabilitas dari material (untuk materila non magnetik  $\mu_r = 1$ ).

Sedangkan coil Induction Furnace yang merupakan tembaga memiliki resistansi yang berubah seiring dengan kenaikan temperatur yang dialaminya. Pada Kondisi temperatur ruang resistansi tembaga ( $R_0$ ) didefinisikan :

$$R_0 = (\rho_c l) / A_t. \tag{21}$$

Pada perubahan temperatur dari temperatur awal ( $T_0$ ) menjadi Temperatur yang baru ( $T_1$ ) berlaku  $\theta_1 - \theta_0 = \Delta\theta$ , maka Resistansi akibat perubahan temperatur  $R_t$  adalah :

$$R_t = R_0 [ 1 + \alpha\theta_0 (\theta_1 - \theta_0) ]. \tag{22}$$

Dengan  $\alpha$  adalah koefisien temperatur pada suhu  $25^0C$  pada tembaga adalah sebesar :  $3.9 \times 10^{-3} K^{-1}$

Sehingga rugi-rugi pada tembaga ( $P_T$ ) sebagai induktor juga selalu mengikuti nilai resistansi seabagaimana pada Efek Joule :

$$P_T = I^2 R_t . \tag{23}$$

Sedangkan panas yang hilang melalui proses konduksi (Shrets *et al.* 1987), from dari dinding furnace hingga lilitan coil tembaga :

$$Q_c = \frac{\pi H_m (\theta_2 - \theta)}{\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\lambda_{xi}} \ln \frac{d_2}{D_c} + \frac{1}{\lambda_{as}} \ln \frac{D_m}{d_2} + \frac{1}{\lambda_{cu}} \right]} \tag{24}$$

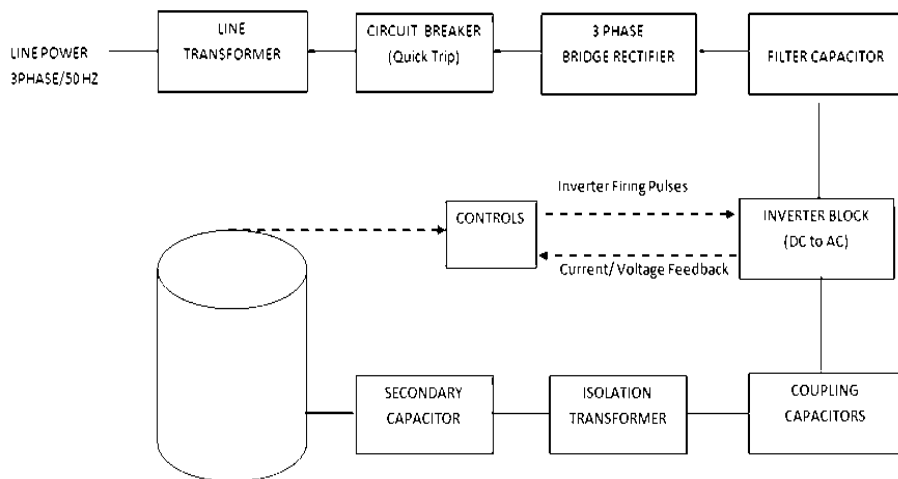
= konduktivitas termal pada zircon, asbestos, dan tembaga

$\lambda_{xi} = 2.093 \text{ w/m K}$  ;  $\lambda_{as} = 0.117 \text{ w/m K}$  ;  $\lambda_{cu} = 380 \text{ w/mK}$

$d_2$  = diameter terluar dari tungku =  $D_c + 2 B_r$  (m)

$d_3$  = diameter induktor yang mengelilingi tungku + 2 ketebalan coil (m)

### 3. BLOK INDUCTION FURNACE



Gambar 3 Diagram Blok Induction Furnace

Dengan thyristor atau SCR lebih banyak dipilih sebagai penyearah tiga fasa. Dengan menggunakan dioda maka fasa hanya akan mulai disearahkan sesudah sudut fasa lebih dari  $30^0$

karena pada saat sudut fasa sama dengan dioda masih dibias reverse. Begitu juga pada fasa-fasa yang lainnya.

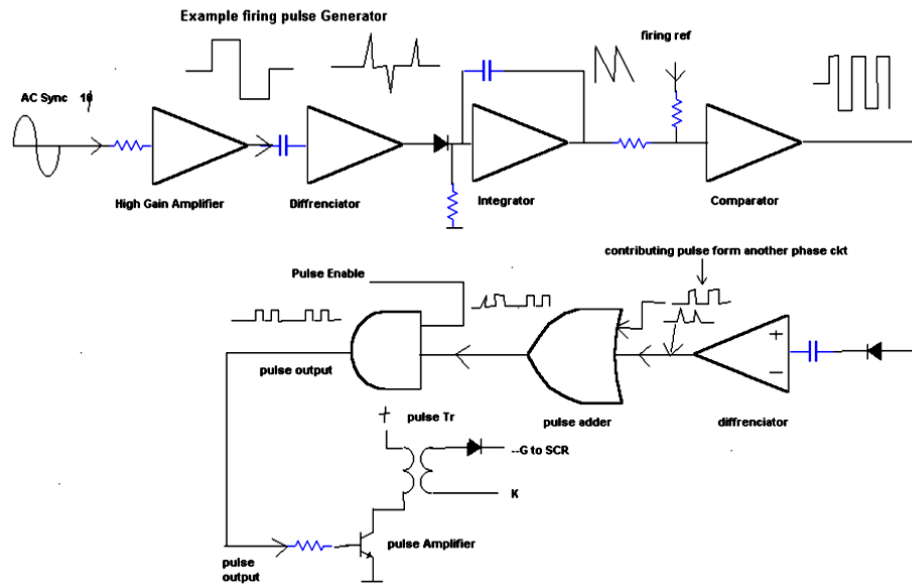
Keterlambatan konduksi komponen penyearah ini dapat diatasi dengan penggunaan SCR yang dapat diatur sudut penyalanya. Sehingga dengan pengaturan sudut penyalan SCR yang dilambangkan dengan  $\alpha$ , konduksi akan tepat terjadi pada saat  $\Theta=30^0$ . Sinkronisasi sinyal sangat diperlukan untum membuat tegangan  $V_R$  lagging (tertinggal)  $30^0$ . Sehingga dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$\theta = \alpha + 30^0$$

Dengan demikian kronologis terjadinya penyearahan tiga fasa pada rangkaian di atas dapat disimpulkan dalam tabel berikut :

Tabel 3. Siklus SCR Konduksi Pada Penyearah Tiga Fasa

Perioda	SCR Konduksi
$\alpha + 30^0$ to $\alpha + 90^0$	$S_1$ and $S_6$
$\alpha + 90^0$ to $\alpha + 150^0$	$S_1$ and $S_2$
$\alpha + 150^0$ to $\alpha + 210^0$	$S_2$ and $S_3$
$\alpha + 210^0$ to $\alpha + 270^0$	$S_3$ and $S_4$
$\alpha + 270^0$ to $\alpha + 330^0$	$S_4$ and $S_5$
$\alpha + 330^0$ to $\alpha + 360^0$ and $\alpha + 0^0$ to $\alpha + 30^0$	$S_5$ and $S_6$



Gambar 4 Diagram Pemicu Gate SCR Penyearah dan Sinkronisasinya

Sinyal Osiloskop menunjukkan sinyal pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian pemicu SCR. Tampak adanya sinyal pulsa yang mengalami sudut yang sama hal ini merupakan bukti dari penjelasan pada Tabel 2. Jika SCR 1 dan SCR6 adalah pasangan SCR konduksi pada fasa  $\alpha+30$  sampai dengan  $\alpha+90$  maka SCR1 akan kembali konduksi pada fasa berikutnya  $\alpha+90$  sampai dengan  $\alpha+120$  tapi berpasangan dengan SCR2.



**3.1. Filter Kapasitor**

Penyearah tiga fase yang menggunakan semikonduktor untuk mengubah tegangan AC menjadi DC dihaluskan oleh filter input kapasitor. Filter ini sengaja dipilih karena kelebihanannya, selain hemat tempat, rangkaian ini juga efektif karena melakukan pendeteksian sinyal pada puncaknya, berbeda dengan input choke yang melakukan deteksi rata-rata.

Pada sebuah sumber tegangan dengan rangkaian gelombang penuh yang diberi frekuensi 50 Hz dari jala-jala listrik makaperioda outputnya adalah :

$$T = 1 / f = 1/100 = 10 \text{ ms}$$

Agar mempunyai konstanta waktu yang panjang maka RLC harus jauh lebih besar dari 10 ms. Biasanya paling sedikit 10 kali lebih besar.

$$RLC \leq 100 \text{ ms}$$

$$VDC = \left(1 - \frac{0.00417}{RC}\right) VM.. \tag{25}$$

Besarnya tegangan ripple ( $V_r$ ) yang dihasilkan didapatkan dengan rumus,

$$V_r = \frac{0.0024}{RC} V_M .. \tag{26}$$

$$C_{min} = 0.24/(r \cdot R_L), \text{ dengan } r \text{ adalah nilai ripple dalam persentase (\%).}$$

**3.2. Inverter**

Inverter adalah sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengubah daya arus searah (DC) menjadi daya arus bolak balik (AC). Tegangan yang dihasilkannya berbentuk gelombang persegi dan pada pemakaian tertentu diperlukan filter agar menghasilkan bentuk gelombang yang sinusoidal.

Inti dari kerja inverter sendiri adalah pengubahan atau konversi frekuensi pada gelombang AC yang dibangkitkan. Dalam Elektronika Daya komponen yang seringkali digunakan sebagai konverter tegangan adalah thyristor, transistor dan tabung vakum (vacuum tubes). Tentunya dengan spesifikasi yang berbeda pengaplikasiannyapun disesuaikan dengan kebutuhan. Perbandingan spesifikasi tiga komponen tersebut sebagai konverter frekuensi adalah :

Tabel 4 Perbandingan Spesifikasi Komponen Konverter

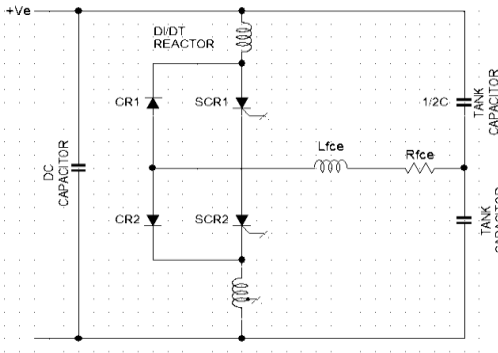
	Thyristor	Transistor	Tabung Vakum
Effisiensi	90%-97%	70%-90%	55%-70%
Frekuensi	100Hz-10kHz	500 kHz	s/d 3000 kHz
Daya	s/d 10 MW	500 kW	1200 kW

Pada pembahasan inverter pada tugas akhir ini akan dipilih inverter yang terdiri dari rangkaian jembatan thyristor dan rangkaian pengatur penyalan/pemicu gerbangnya. Rangkaian pemicu penyalannya digunakan untuk mengatur tegangan dan frekuensi yang dihasilkan oleh inverter. Periode pulsa yang memicu thyristor itulah yang frekuensi yang dihasilkan dan tegangan efektif ditentukan oleh lebar pulsa tersebut.

### 3.2.1. Rangkaian dan Prinsip Kerja Inverter

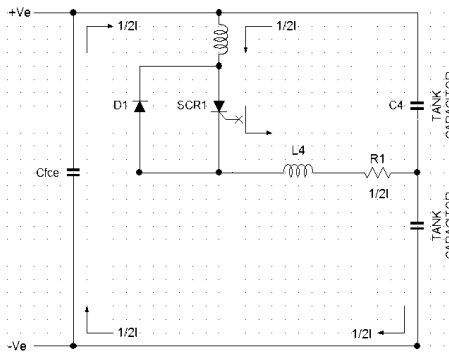
Pada Gambar 3.4.A adalah penyederhanaan salah satu skematik inverter. Dengan tegangan input yang berasal dari hasil konversi rangkain penyearah dan rangkaian keluaran yang berupa kompisisi dari tiga elemen yaitu resistansi, kapasitansi, dan induktansi.

Sebagai pendekatan pertama, SCR dianggap sebagai switch yang bersifat terbuka dan tertutup. Dengan memberikan pulsa pemicu ke SCR1 maka akan terjadi konduksi dan SCR akan melewati arus, selama interval waktu tertentu. Dan secara bergantian dengan interval waktu yang sama pula, dengan melakukan penyalaan pada SCR2 maka akan dihasilkan sinyal gelombang kotak tegangan bolak-balik. Pemicuan SCR tidak boleh terjadi dalam waktu yang sama karena akan menyebabkan terjadinya hubungan singkat pada tegangan jepit.



Gambar 5 Skematik Inverter

Besarnya tingkat kenaikan arus juga mesti menjadi perhatian sendiri untuk melindungi SCR agar tetap bekerja pada daerah kerjanya dengan baik. Kenaikan arus yang berlangsung terlalu cepat akan dapat menyebabkan kerusakan pada SCR. Dengan mengintegrasikan penggunaan DI/DT reaktor maka perubahan arus dapat terkontrol seiring dengan fungsi waktu pada level operasi SCR yang aman.



Gambar 6 Skematik Inverter Konduksi Setengah Siklus

Secara umum tegangan keluaran ( $V_{RMS}$ ) dari sebuah inverter, dipengaruhi ole fungsi tegangan (V) terhadap frekuensi atau periode (T), diformulasikan sebagai berikut :

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt\right)} \quad .(27)$$

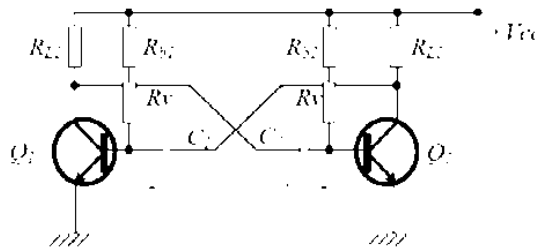
Karena V merupakan tegangan input bagi inverter yang stabil nilainya  $V_{DC}$  formula di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$V_{RMS} = V_{dc} \sqrt{\frac{\sum tp}{T}} \quad .(28)$$

Dengan  $t_p$  adalah lebar pulsa dalam satu periode. Dengan demikian tegangan output dari inverter selain dipengaruhi oleh frekuensi juga dipengaruhi oleh lebar pulsa tinggi dalam 1 periode.

### 3.2.2. Rangkaian Firing Inverter

Rangkaian Firing pada inverter yang dibuat untuk memberikan dan mengatur penyalan SCR pada dasarnya adalah osilator. Osilator adalah sebuah perangkat yang mampu menghasilkan gelombang dengan perioda/frekuensi tertentu. Banyak cara yang bisa dilakukan untuk merancang osilator salah satunya seperti pada rangkaian berikut :



Gambar 7 Rangkaian Astable Multivibrator

Astable Multivibrator adalah penghasil gelombang dengan pengaturan lebar pulsa pada siklus positif.

Proses kerjanya transistor  $Q1$  dan  $Q2$  bekerja ON (saturasi) dan OFF (*cut off*) secara bergantian. Proses tersebut terjadi terus hingga terbentuk suatu sinyal tegangan denyut pada kolektor pada ke dua transistor tersebut. Selang waktu pergantian antar ON dan OFF dari kedua transistor disebut sebagai konstanta waktu dari osilator yang besarnya adalah:

$$T1 = 0,69 \times RB1 \times C1 \tag{29}$$

dengan :

$T1$  = waktu  $\frac{1}{2}$  dari periode ON ke OFF kembali ke ON lagi dari transistor  $Q1$ (dt)

$RB1 = Rb1 + Rv$  adalah tahanan rangkaianbasis transistor ( $\Omega$ ).

$C1$  = kapasitansi kondensator rangkaian basis

$T2$  dapat diperoleh menggunakan persamaan di atas dengan nilai tahanan dan kondensator adalah  $RB2$  dan  $C2$ . Jadi :

$$T1 + T2 = T$$

$$T = 0,69 \times (RB1 \times C1 + RB2 \times C2).$$

Jika ditentukan  $RB1 = RB2 = RB$  dan  $C1 = C2 = C$ ,

maka diperoleh :

$$T = 0,69 \times 2 \times RB \times C$$

$$T = 1,38 \times RB \times C \tag{30}$$

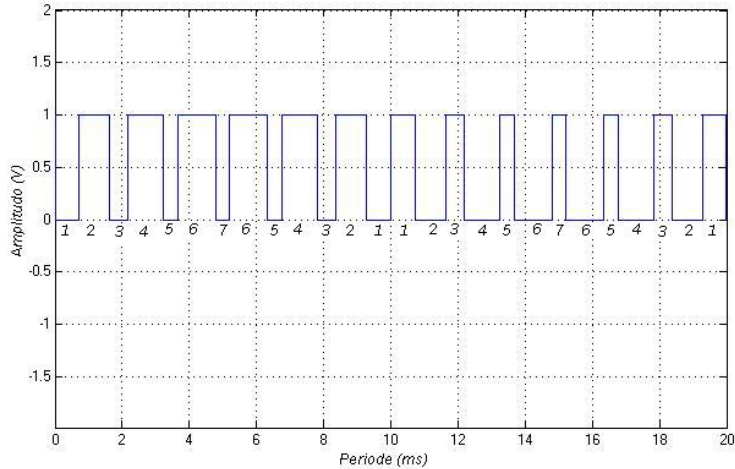
Sehingga frekuensi osilasi  $f = 1/T$  (Hz) Dari persamaan di atas diperoleh besarnya frekuensi osilasi terantung  $RB$  dan atau  $C$ . Secara teknis lebih mudah dilakukan dengan mengubah tahanan  $RB$ .

Pada Induction Furnace yang inverternya bekerja frekuensi maksimum 1200 Hz maka, Jika diberikan nilai  $R_B$  adalah 10 Kohm maka nilai dari kapasitor ( $C$ ) adalah :

$$T = 1,38 \times R_B \times C$$

$$1/1200 = 1,38 \times 10000 \times C$$

$$C = 0.6 \mu F$$



Gambar 8 Sinyal Penyalaan SCR

#### 4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

##### Data Pengamatan Daya Induction Furnace

Sebagai bahan pengamatan data dan analisa adalah unit induction furnace yang memiliki kapasitas daya dan spesifikasi sebagai berikut :

- Tegangan Input : 480 VAC/ 3 Fasa
- Frekuensi Input : 50 Hz
- Daya Input : 500 kVA
- Tegangan Output : 1200 V
- Daya Output : 450 kW
- Frekuensi Output : 1200 Hz (max)

Dengan Daya Nyata Maksimum ( $P_T$ ) sebesar 450 KW dan Tegangan tiga fasa pada sisi input ( $V_{in}$ ) 480 V. Maka besarnya arus pada sisi input AC ( $I_{in}$ ) adalah :

$$P_T = V_{in} * I_{in} * \cos \alpha * \sqrt{3} ; I_{in} = P_T / (V_{in} * \cos \alpha * \sqrt{3})$$

$$I_{in} = 450.10^3 / (480 * 0.89 * \sqrt{3}), \quad I_{in} = 608A$$

Dengan menggunakan persamaan Efek Joule, Disipasi daya sebesar 450 KW dihasilkan oleh resistansi coil furnace secara murni pada saat terjadinya resonansi. Besarnya Resistansi Coil Furnace ( $R_L$ ) adalah

$$X_L = X_C = 0, \text{ maka } P_T = 3 * I^2 * R$$

$$R_L = P_T / (3 * I^2) \quad R_L = 450.10^3 / (3 * 608^2) \quad R = 2.5 \text{ ohm}$$

Tegangan Output Penyearah Jembatan Penuh (VDC) terkendali dengan sudut penyalan  $\alpha = 30^\circ$ , dan Tegangan Input ( $V_M$ ) = 480 V

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_M \cos \alpha \quad V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} 480 \cos 30^\circ \text{ V} \quad V_{dc} = 670 \text{ V}$$

Pada Filter Input Kapasitor sumber tegangan yang telah disearahkan akan dihaluskan sebagaimana berikut ini :

$$C_{min} = 0.24 / (r * R_L), \text{ dengan } r \text{ adalah nilai ripple dalam persentase (\%).}$$

$$V_{DC} = \left(1 - \frac{0.00417}{RC}\right) V_M, \quad V_{DC} = \left(1 - \frac{0.00417}{2.5 * 5.10^{-6}}\right) 670 = 658 \text{ V}$$

Besarnya tegangan ripple ( $V_r$ ) yang dihasilkan didapatkan dengan rumus,

$$V_r = \frac{0.0024}{2.5 * 5.10^{-6}} V_M, \quad V_r = 13.4 \text{ V}$$

Pada saat terjadi Resonansi Frekuensi maka nilai Arus ( $I_r$ ) yang terjadi pada coil furnace adalah :

$$I_r = V_{DC} / R_L \quad I_r = 658 / 2.5 \text{ A} \quad I_r = 268 \text{ A}$$

Pada Induction Furnace 450 KW diketahui nilai total induktansi dalah 60 mH, dan nilai total kapasitansi adalah 30 uF.

Maka nilai frekuensi maksimum yang juga merupakan frekuensi resonansi ( $f_r$ ) adalah :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{60 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-6}}}, \quad f_r \cong 1200 \text{ Hz}$$

Nilai Tegangan Furnace ( $V_0$ ) adalah :

$$V_0 = V_L = V_C, \quad V_0 = I \cdot X_L = I \cdot X_C, \quad V_0 = I \cdot 2\pi f_r L = I / (2\pi f_r C)$$

$$V_0 = 268 \cdot 2.3,14 \cdot 1200 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \text{ atau } V_0 = 268 / (2 \cdot 3,14 \cdot 1200 \cdot 30 \cdot 10^{-6}) \quad V_0 \approx 200 \text{ V}$$

Sehingga nilai Q (Quality Factor) nya adalah

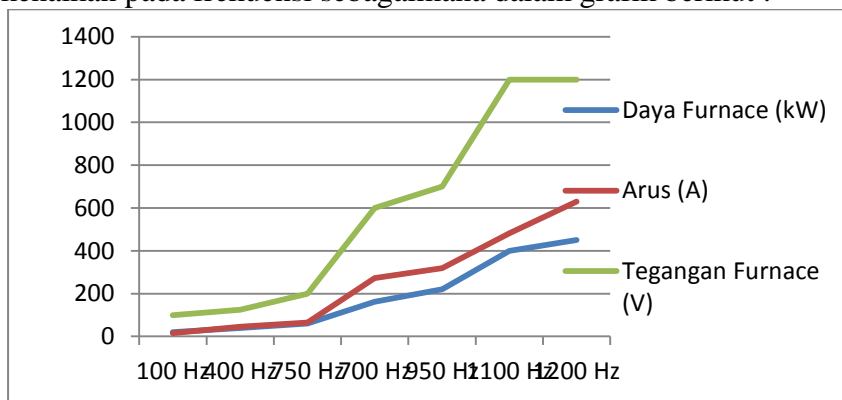
$$Q = V_L / V = V_C / V, \quad Q = 1200 / 658, \quad Q = 1.82$$

Hubungan antara Frekuensi, Arus, Daya dan Tegangan Furnace adalah :

Tabel 5 Hubungan Frekuensi, Daya, Arus, dan Tegangan Induction Furnace Berkapasitas Daya 450 kW

Frekuensi (Hz)	Daya Furnace (Kilowatt)	Arus Furnace (Ampere)	Tegangan Furn. (Volt)
200	20	15	100
400	40	45	125
750	60	65	200
950	162	273	600
1000	220	319	700
1100	400	482	1200
1200	450	630	1200

Dari diatas korelasi antara daya, arus dan tegangan pada furnace mengalami kenaikan sebagaimana kenaikan pada frekuensi sebagaimana dalam grafik berikut :



Gambar 9 Grafik Hubungan Frekuensi, Daya, Arus, dan Tegangan Induction Furnace 450 kW

## 5. PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan pada penelitian maka didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Induction Furnace adalah teknologi yang diterapkan dengan memanfaatkan Arus Addy yang dihasilkan oleh medan elektromagnetik. Rugi-rugi akibat Arus Eddy yang menghasilkan disipasi panas inilah kemudian dimanfaatkan untuk dapat melebur logam. Pada Perancangan Induction Furnace berdasarkan kapasitas dayanya, didapati bahwa semakin besar kapasitas dayanya maka semakin tinggi sumber tegangan inputnya. Hal ini dimaksudkan agar furnace bekerja tetap dengan arus yang rendah dengan frekuensi yang lebih rendah daripada furnace dengan kapasitas di bawahnya.
2. Pemilihan Thyristor atau SCR dalam penyearah DC disebabkan oleh pertimbangan adanya ketepatan terjadinya konduksi untuk terjadinya penyearahan. Pengaturan penyalaan pada gate yang mempengaruhi waktu konduksi pada SCR menyebabkan keluaran yang lebih optimal dalam penyearahan. Selain itu dengan sifatnya yang memiliki gate sebagai pemicu konduksi, SCR memungkinkan adanya kontrol terintegrasi baik sebagai pengaman komponen atau dalam kaitannya dengan rangkaian lain.  
Pemilihan Thyristor sebagai komponen utama inverter, adalah disebabkan efisiensi kerjanya yang mencapai 90%, frekuensi kerjanya yang fleksibel 100Hz-10kHz, juga dayanya yang mencapai 10 MW. Pembangkitan daya induksi elektromagnetik akan menghasilkan arus beban yang tertinggal  $90^0$  pada fasa sehingga diperlukan kompensasi dengan menggunakan kapasitor yang harus memiliki reaktansi kapasitif yang hampir sama dengan reaktansi induktif pada coil. Dengan demikian terjadi frekuensi resonansi yang bukan saja mampu menahan laju arus akibat reaktansi induktif tapi juga memperbaiki faktor daya.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Bird. John, 2003, *Electrical & Electronic Principle & Technology*, Second Edition, Linacre House, Jordan Hill, USA
- G. Oriti and A. Julian, *Hybrid rectifier using thyristors and IGBT's for low cost regenerative drives, in Proc. IEEE APEC*, 2000, pp. 951–956.
- Hammond, P. 1978, *Electromagnetism for Engineers - An Introductory Course*. Pergamon, Oxford, London, UK.
- Hatanaka, *Characteristics of Zero Current Switching High Frequency Inverter with Constant Fre-quency Power Control*, *Trans. Of JIEE*, Vol. 1 14-D, No. 6, pp.6 16-622 ( 199zL6)
- Ilori, B.O, 1991. *Design of Electric Arc Furnace. B. Eng Thesis*, Mechanical Engineering Department, Federal University of Technology, Minna, Nigeria.
- Semiatin, S. Zinn, S.L. 1988. **Elements of Induction Heating**, ASM International
- Shrets, I.; Tolubinsky, V.; Kirakovsky, N.; Neduzhy, I.; and Sheludko, I. 1987. *Heat Engineering*. Mir Publ., Moscow, Rusia.
- V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, 2003, *Handbook of Induction Heating*, Marcel Dekker, New York.
- Zuhal, 1980, *Dasar Tenaga Listrik*, ITB, Bandung.