

PERANCANGAN KOIL PEMANAS UNTUK TUNGKU INDUKSI MENGUNAKAN KONDUKTOR TEMBAGA

Dede Sutarya¹ dan Agus Sartono DS¹

¹ Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir
Badan Tenaga Nuklir Nasional, Serpong, Banten, Indonesia, 15313
dedes@batan.go.id

ABSTRAK — Teknologi pemanas induksi saat ini merupakan teknologi pemanas pilihan dalam banyak aplikasi industri dan medis karena keunggulannya mengenai efisiensi, pemanasan cepat, keamanan, kebersihan, dan kontrol yang akurat. Kemajuan dalam teknologi utama, yaitu, elektronika daya, teknik kontrol, dan desain komponen magnetik, telah memungkinkan pengembangan sistem yang sangat andal dan hemat biaya, menjadikan teknologi ini tersedia dan ada di mana-mana. Makalah ini menyajikan teknik untuk merancang dan menghitung parameter koil yang akan digunakan dalam tungku induksi. Dalam desain kumparan pemanas, bentuk dan jumlah belitan kumparan adalah faktor desain yang sangat penting karena mereka menentukan kinerja operasi keseluruhan dari pemanas induksi termasuk frekuensi resonansi, ESR dan faktor Q.

Kata Kunci – Pemanas Induksi, Sirkuit Resonansi, Sirkuit Inverter, Desain Koil.

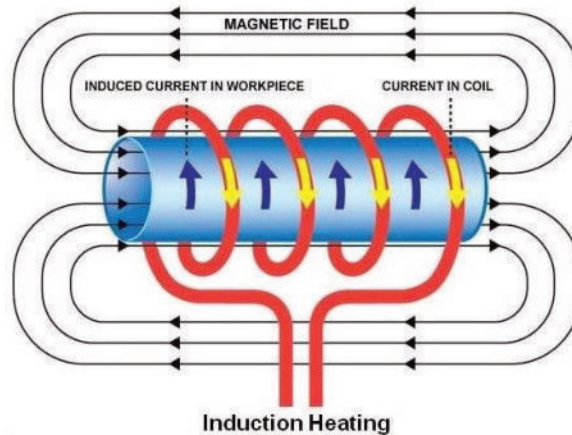
ABSTRACT — Induction heating technology is nowadays the heating technology of choice in many industrial and medical applications due to its advantages regarding efficiency, fast heating, safety, cleanness, and accurate control. Advances in key technologies, i.e., power electronics, control techniques, and magnetic component design, have allowed the development of highly reliable and cost-effective systems, making this technology readily available and ubiquitous. This paper presents a technique to design and calculate the parameters of the coil to be used in induction furnace. In the design of heating coil, the shape and the turn numbers of the coil are very important design factors because they decide the overall operating performance of induction heater including resonant frequency, ESR and Q factor.

Keywords – Induction Heating, Resonant Circuit, Inverter Circuit, Coil Design.

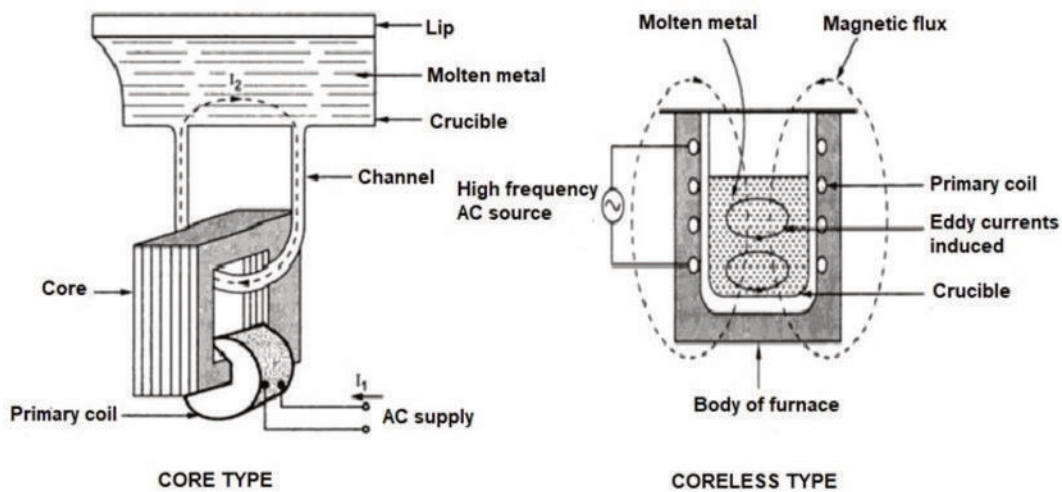
I. PENDAHULUAN

Pemanasan induksi banyak digunakan dalam industri logam karena efisiensi pemanasan yang baik, tingkat produksi yang tinggi, dan lingkungan kerja yang bersih. Pengembangan catu daya frekuensi tinggi memungkinkan penggunaan tungku induksi untuk peleburan logam di pabrik pengecoran kontinyu [1-4]. Pemanasan induktif terdiri dari arus listrik induksi dalam benda kerja konduktif atau logam yang akan dilebur yang disebabkan oleh medan magnet bolak-balik. Arus listrik (eddy current) menghasilkan panas yang disebabkan oleh efek resistif benda kerja dan efek histeresis pada bahan magnetik menambah panas. Tidak ada kontak fisik antara sumber energi dan benda kerja. Secara sederhana prinsipnya pemanas induksi diilustrasikan pada Gambar 1. Rentang kompleksitas koil (work coil) mulai dari bentuk sederhana yang terdiri dari

beberapa lilitan pipa tembaga yang melingkari mandrel, hingga koil presisi yang dibuat menggunakan mesin. Untuk tungku induksi peleburan, koil dibuat menggunakan kumparan besar yang diintegrasikan ke dalam struktur tungku.



Gambar 1. Prinsip dasar pemanas induksi [5]



Gambar 2. Klasifikasi tungku induksi

Tungku induksi dikelompokkan menjadi dua jenis atau tipe yaitu tungku induksi dengan inti (core or channel induction furnace) dan tungku induksi tanpa inti (coreless induction furnace) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. *Coreless induction furnace* tidak memiliki inti atau induktor tidak seperti *core induction furnace*. Pada *coreless induction furnace* keseluruhan crucible berfungsi sebagai area pemanas induksi. Koil tembaga mengelilingi lapisan bahan tahan api yang mengelilingi seluruh panjang interior tungku. Dengan arus listrik yang kuat melalui koil akan membangkitkan medan magnet yang menembus bahan tahan api dan melelehkan bahan di dalam *crucible* didalam

tungku. Koil tembaga tetap terlindung dari proses pelelehan dengan air pendingin yang mengalir didalam koil. Tungku induksi tanpa inti (coreless induction furnace) merupakan jenis tungku induksi yang paling populer karena kesesuaiannya untuk semua industri logam [6]. Tungku induksi tanpa inti merupakan sistem sederhana yang terdiri dari koil yang melingkar mengelilingi *crucible* atau wadah tahan api yang berisi bahan yang akan dilebur dan terhubung ke sebuah sistem eksitasi bolak-balik [7].

Perancangan koil yang optimal sangat penting untuk efektivitas dan efisiensi proses pemanasan pada tungku induksi. Oleh karena itu, dalam makalah ini dilakukan perancangan koil yang optimal untuk daya 10 KW dan frekuensi kerja 150 – 400 KHz yang akan digunakan untuk proses peleburan logam.

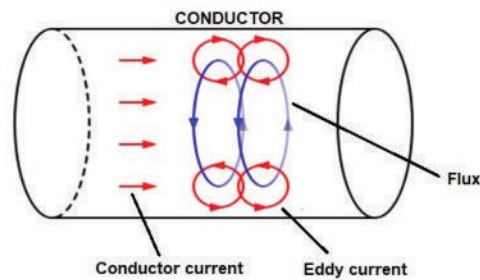
II. FAKTOR DALAM PERANCANGAN KOIL PEMANAS INDUKSI

Dalam perancangan koil untuk tungku induksi, terdapat beberapa faktor yang harus dipertimbangkan yaitu; efek kulit (skin effect), efek kedekatan antar lilitan koil (proximity effect), geometri, bahan konduktor, jumlah lilitan dan frekuensi operasi. Penjelasan singkat terhadap beberapa faktor tersebut adalah sebagai berikut.

A. Efek kulit (skin effect)

Efek kulit adalah fenomena elektromagnetik yang paling terkenal yang terkait dengan pemanas induksi [8-10]. Efek kulit terjadi ketika arus sinusoidal mengalir melalui konduktor dan menciptakan fluks magnet sinusoidal di dalam konduktor yang tegak lurus terhadap sumbu konduktor seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa fluks magnet yang pada bagian silinder konduktor didekat pusat lebih besar daripada bagian silinder lain di dekat permukaan konduktor. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa bagian tengah dalam silinder dikelilingi oleh fluks internal maupun eksternal, sedangkan bagian luar silinder hanya dikelilingi oleh fluks eksternal saja.

Induktansi diri (self inductance) pada bagian dalam silinder lebih banyak oleh karena itu akan menghasilkan reaktansi induktif yang lebih besar daripada bagian luar silinder. Perbedaan dalam reaktansi induktif ini memberi kecenderungan pada arus berkonsentrasi ke permukaan atau kulit konduktor. Kepadatan arus maksimum terjadi di permukaan konduktor dan minimum dipusat konduktor. Efeknya setara dengan pengurangan area penampang konduktor, oleh karena itu resistensi efektif konduktor meningkat.



Gambar 3. Efek kulit pada sebuah konduktor

Faktor yang mempengaruhi efek kulit:

1. Frekuensi; Efek kulit meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi yang digunakan pada koil induksi.
2. Diameter; Peningkatan ukuran diameter konduktor akan meningkatkan efek kulit.
3. Bentuk konduktor; Efek kulit lebih banyak pada konduktor padat dan lebih sedikit pada konduktor puntir karena luas permukaan konduktor padat lebih banyak.
4. Jenis bahan; Efek kulit meningkat dengan meningkatnya permeabilitas material (Permeabilitas adalah kemampuan material untuk mendukung pembentukan medan magnet).

Untuk kedalaman kulit konduktor padat adalah kedalaman penetrasi arus yang mengalir seperti yang diturunkan dalam Kraus dan Fleisch [11]. Kedalaman efek kulit ini adalah fungsi dari frekuensi, permeabilitas dan konduktivitas bahan konduktor. Kedalaman kulit biasanya diekspresikan sebagai δ :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} m \quad (1)$$

Untuk konduktor dengan bahan tembaga;

$$\delta = \frac{0.066}{\sqrt{f}} m \quad (2)$$

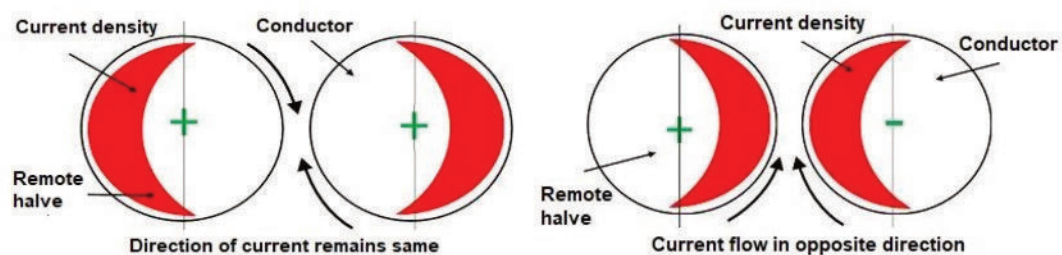
di mana, δ adalah kedalaman efek kulit, f adalah frekuensi operasi, μ adalah permeabilitas bahan penghantar, σ adalah konduktivitas bahan konduktor. Arus eddy meningkat dengan meningkatnya frekuensi tapi akibatnya kerugian konduksi juga meningkat.

B. Efek kedekatan (proximity effect)

Ketika sebuah konduktor membawa tegangan tinggi bolak-balik maka arus tidak terdistribusi secara merata pada area penampang konduktor. Efek ini disebut efek kedekatan (proximity effect). Efek kedekatan menghasilkan peningkatan resistensi dari

konduktor karena adanya konduktor lain yang membawa arus di sekitarnya. Ketika dua atau lebih konduktor ditempatkan berdekatan satu sama lain, maka medan elektromagnetiknya saling berinteraksi. Karena interaksi tersebut, arus pada masing-masing didistribusikan kembali sehingga kepadatan arus yang lebih besar terkonsentrasi di bagian untai yang paling jauh dari konduktor yang mengganggu.

Jika konduktor membawa arus dalam arah yang sama, maka medan magnet dari separuh konduktor yang berdekatan satu sama lain saling membatalkan dan karenanya tidak ada aliran arus yang membagi bagian konduktor. Arus ramai di bagian terpencil konduktor. Ketika konduktor membawa arus dalam arah yang berlawanan, maka bagian dekat konduktor membawa, semakin banyak arus dan medan magnet dari setengah jauh dari konduktor saling membatalkan. Dengan demikian, arus nol di bagian terpencil konduktor dan ramai di bagian dekat konduktor.



Gambar 4. Efek kedekatan (proximity effect)

Jika DC mengalir pada permukaan konduktor, maka arus didistribusikan secara merata di sekitar area penampang konduktor. Karenanya, tidak ada efek kedekatan yang terjadi pada permukaan konduktor. Efek kedekatan penting hanya untuk ukuran konduktor yang lebih besar dari 125 mm^2 . Faktor koreksi harus diterapkan untuk mempertimbangkan fakta ini.

C. Geometri, bahan konduktor, jumlah lilitan dan frekuensi operasi

Faktor-faktor berikut merupakan parameter yang harus dipertimbangkan dalam perancangan koil pemanas induksi.

- Jenis konduktor koil: konduktor padat (litz wire) atau pipa (tube). Pada frekuensi tinggi, kehilangan akibat efek kulit lebih tinggi pada konduktor padat dibandingkan dengan konduktor pipa (tubing).
- Bentuk konduktor koil: bentuk konduktor koil yang dapat digunakan dengan penampang lintang lingkaran atau persegi panjang. Pada konduktor dengan

penampang lintang lingkaran arus akan mengalir secara seragam, tetapi untuk penampang lintang persegi panjang aliran arus terkonsentrasi di bagian sudut atau tepi konduktor.

- Jumlah lilitan koil: Jumlah lilitan koil tergantung pada diameter dan panjang *crucible* atau benda kerja.
- Frekuensi pengoperasian: Tungku induksi yang akan digunakan beroperasi pada frekuensi 150 - 400 kHz. Frekuensi operasi yang sesuai harus ditentukan sesuai dengan ukuran dan jumlah lilitan koil untuk pengoperasian tungku induksi yang optimal.

III. PERHITUNGAN RANCANGAN KOIL TUNGKU INDUKSI

Parameter operasi tungku induksi yang diinginkan adalah sebagai berikut; temperatur ruang 25°C, temperatur lebur 1500°C dan durasi waktu sekitar 30 menit. Sedangkan frekuensi operasi RF generator yang digunakan adalah 150 – 400 KHz dengan daya maksimum 10 KW. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi konduktor digunakan sebagai koil dengan bahan tembaga.

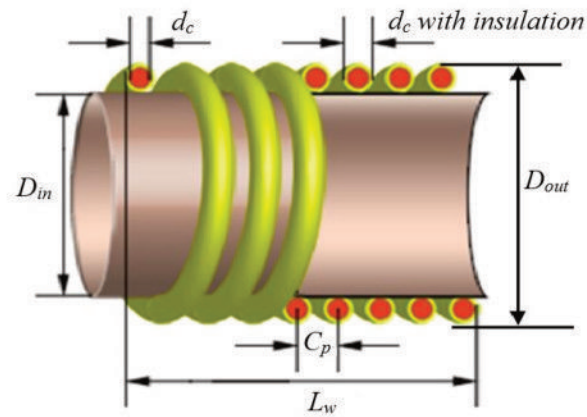
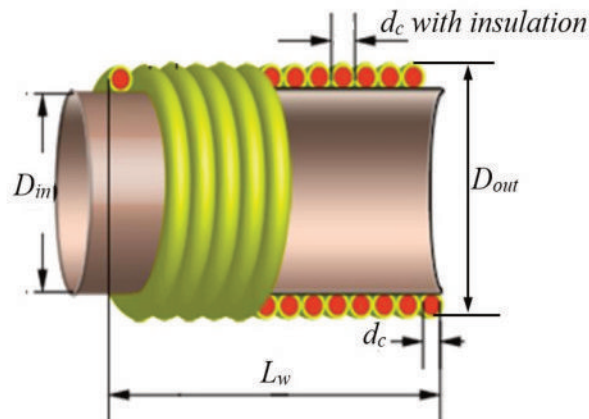
Tabel 1. Spesifikasi bahan konduktor tembaga untuk koil

Spesifikasi	Satuan	Nilai
Resistivitas	Ωm	1.7×10^{-8} (20°C)
Permeabilitas	Hm	1
Densitas	Kg/m^3	7861.13

Untuk mencari parameter optimal dalam pengoperasian tungku induksi maka dalam perhitungan frekuensi operasi akan di variasikan 150, 200, 250, 300,350 dan 400 KHz. Spesifikasi koil yang digunakan dalam rancangan mengikuti geometri *crucible* yang digunakan. Geometri koil tersebut di perlihatkan pada Tabel 2, sedangkan skematik rancangan koil yang digunakan dalam rancangan diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6.

Tabel 2. Geometri koil yang digunakan dalam rancangan

Spesifikasi	Satuan	Nilai
Diameter dalam koil (D_{in})	mm	60.00
Diameter luar koil (D_{out})	mm	66.50
Diameter konduktor koil (d_c)	mm	6.00
<i>Coil pitch</i> (C_p)	mm	9.00

Gambar 5. Lilitan koil dengan *pitch*Gambar 6. Lilitan koil tanpa *pitch*

A. Induktansi dan rangkaian ekuivalen

Koil dan benda kerja memiliki sipat khusus yaitu nilai resistansi dan reaktansi yang disebabkan oleh resistivitas dan fluks yang diterima. Dengan menggunakan rumus Wheeler, induktansi koil (working coil) dapat dihitung sebagai berikut.

$$L_C = \frac{r_{out} N^2}{0.0254 (9 r_{out} + 10 l_{WC})} \quad (3)$$

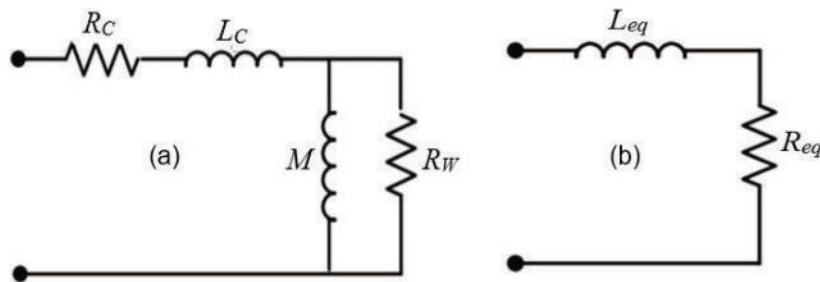
Dimana L_C merupakan induktansi koil (μH), r_{out} adalah radius bagian luar koil (m), dan l_{WC} adalah panjang konduktor koil (m).

Koil dan benda kerja dapat diwakili oleh rangkaian seri induktansi dan resistansi peralatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

$$L_{eq} = L_C + M \quad (4)$$

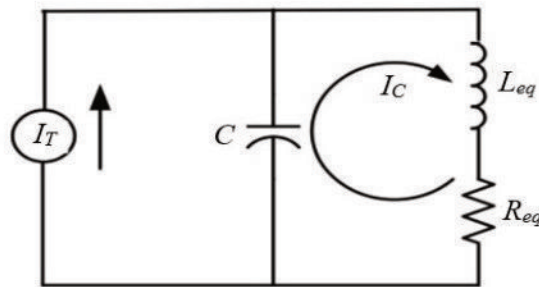
$$R_{eq} = R_C + R_W \quad (5)$$

Dimana M merupakan induktansi magnetisasi (H), L_{eq} adalah induktansi ekuivalen koil dan benda kerja (H), dan R_{eq} adalah resistansi ekuivalen koil dan benda kerja (Ω).



Gambar 7. Rangkaian (a) dan rangkaian ekuivalen (b) impedansi koil dan benda kerja

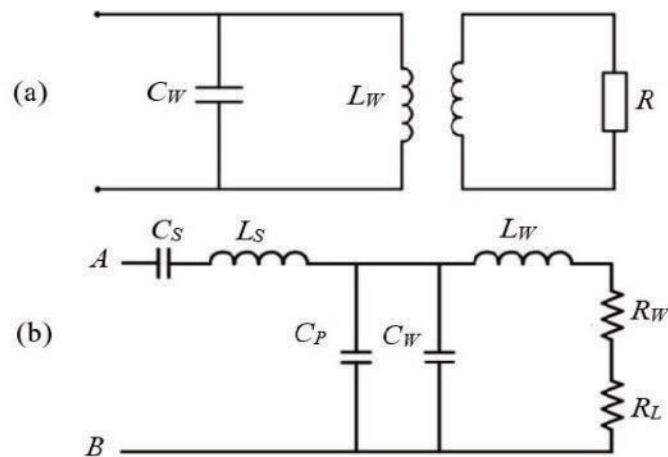
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, induktansi dan resistansi koil dan benda kerja dihubungkan secara seri. Agar terjadi resonansi maka rangkaian kapasitor dihubungkan dengan rangkaian resonansi secara paralel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian resonansi untuk beban

Jika kapasitor diberi muatan melalui catu daya maka energi akan tersimpan dalam kapasitor, energi tersebut akan di transfer ke induktansi L_{eq} dan kembali lagi ke kapasitor dengan demikian frekuensi osilasi tergantung pada nilai induktansi dan kapasitansi. Dalam rangkaian, disipasi energi dalam resistansi R_{eq} dan setiap selesai siklus osilasi energi yang ada di kapasitor akan tereduksi.

Karakteristik tersebut memiliki karakteristik yang diinginkan sebagai rangkaian inverter resonansi seri-paralel. Pengaturan rangkaian hubung singkat dengan beban dan tanpa beban dimungkinkan. Efisiensi pada beban tinggi dimungkinkan dengan pemilihan komponen resonansi yang tepat. Sebuah resonan inverter dapat dioperasikan diatas atau dibawah frekuensi resonansinya dengan sistem penyesuaian impedansi (matching networks) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9(b). Sirkuit tangki (tank circuit) yang menggabungkan koil (L_w) dan kapasitornya (C_w) dapat dianggap sebagai sirkuit resonansi paralel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9(a).



Gambar 9. Diagram rangkaian *tank circuit* (a) dan *matching network* (b)

Ini memiliki resistensi (R) karena benda kerja yang hilang dipasangkan ke dalam koil kerja karena kopling magnetik antara dua konduktor. Dalam praktiknya, resistensi koil kerja, resistensi kapasitor tangki dan resistensi benda kerja, semuanya menimbulkan kerugian pada tangki. sirkuit dan resonansi basah. Oleh karena itu, penting untuk menggabungkan semua kasus ini menjadi resistensi kerugian tunggal. Dalam kasus rangkaian resonansi paralel resistensi rugi ini muncul langsung di seluruh rangkaian tangki. Perlawanan ini mewakili hanya komponen yang dapat mengkonsumsi daya dan oleh karena itu dapat bertahan sebagai beban yang sedang dicoba untuk mendorong daya menjadi seefisien mungkin.

B. Jumlah lilitan koil

Jumlah lilitan koil utamanya didasarkan pada panjang benda kerja dan pitch lilitan koil, yang dinyatakan sebagai berikut.

$$N = \frac{L_W}{d_C + C_P} \quad (6)$$

Dimana N merupakan jumlah lilitan koil, L_W adalah tinggi koil atau tinggi benda kerja yang akan dilebur, d_C adalah diameter konduktor (koil) (m), C_P adalah *pitch* koil (m). Terdapat dua skema lilitan koil yaitu lilitan koil dengan *pitch* dan tanpa *pitch* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5 dan 6.

Perhitungan diameter dalam D_{in} dan diameter luar D_{out} dari koil adalah sebagai berikut.

$$D_{in} = d_w + 2C_p \quad (7)$$

$$D_{out} = D_{in} + 2d_c \quad (8)$$

Dimana d_w adalah diameter koil (m) dan d_c adalah diameter konduktor (m). total panjang konduktor koil ditentukan dengan persamaan berikut.

$$l_c = 2l_{lead} + N\sqrt{(2\pi r_m)^2 + (1.5d_c)^2} \quad (9)$$

Dimana l_c adalah panjang konduktor koil (m), l_{lead} adalah panjang lead koil (m), dan r_m adalah radius bagian dalam koil (m).

Ketebalan minimum konduktor harus setidaknya dua kali kedalaman penetrasi arus dalam konduktor itu sendiri. Oleh karena itu, ketebalan minimum konduktor adalah

$$t_c = 2\delta_c \quad (10)$$

Dimana t_c adalah ketebalan minimum konduktor koil (m), δ_c adalah kedalaman penetrasi arus dalam konduktor (m). Kedalaman penetrasi arus dalam konduktor ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_c \mu_0 \sigma_c}} \quad (11)$$

Dimana μ_c adalah permeabilitas konduktor koil (H/m), μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa (H/m), μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa (H/m), σ_c adalah konduktivitas listrik dari konduktor (mho/m), dan f adalah frekuensi operasi (Hz).

IV. HASIL PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN

Pada perancangan ini, konfigurasi geometri koil yang digunakan adalah multi-lilitan koil dengan *pitch* dan tanpa *pitch* seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Hasil perhitungan untuk rancangan koil pemanas dengan *pitch* diperlihatkan pada Tabel 3 – 5. Sedangkan untuk rancangan koil tanpa *pitch* diperlihatkan pada Tabel 6 – 8.

Pada Tabel 3 dan 6 terlihat nilai ESR dan faktor Q berubah sesuai dengan frekuensi operasi yang digunakan. Resistansi seri ekuivalen (ESR) adalah salah satu karakteristik kapasitor yang tidak ideal yang dapat menyebabkan berbagai masalah kinerja dalam rangkaian. Nilai ESR yang tinggi menurunkan kinerja karena kehilangan arus dan penurunan tegangan yang lebih tinggi. Dalam beberapa aplikasi, panas yang dihasilkan akibat ESR mungkin kecil dan tidak menjadi masalah. Namun, dalam beberapa rangkaian, terutama aplikasi arus tinggi, panas yang hilang dapat menyebabkan kenaikan temperatur yang signifikan, mempengaruhi operasi rangkaian, dan menurunkan kinerja kapasitor. Selain itu, sejumlah besar penurunan tegangan terjadi pada resistansi sehingga mengurangi sebagian energi yang berguna dalam aplikasi.

Nilai ESR bervariasi sesuai dengan jenis kapasitor dan kondisi operasi seperti frekuensi dan temperatur.

Tabel 3. Hasil perhitungan induktansi koil dengan pitch dengan variasi frekuensi operasi

Frek. operasi f (KHz)	Induktansi L_c (μ H)	Kapasitansi C (pF)	Frek. Resonansi f_r (MHz)	ESR (Ohm)	Faktor Q
150	33.692	8.670	7.796	0.170	187
200	33.692	8.670	7.796	0.197	215
250	33.692	8.670	7.796	0.222	238
300	33.692	8.670	7.796	0.244	260
350	33.692	8.670	7.796	0.266	279
400	33.692	8.670	7.796	0.284	298

Tabel 4. Hasil perhitungan parameter koil dengan pitch untuk variasi frekuensi operasi

Frekuensi (KHz)	Panjang lilitan l (m)	Panjang konduktor koil l_c (m)	Reaktansi koil R_w (Ohm)	Kapasitansi eksternal C_w pF)	Jumlah Lilitan koil (N)
150	0.706	16.281	31.754	33407.503	78
200	0.706	16.281	42.339	18787.926	78
250	0.706	16.281	52.923	12021.151	78
300	0.706	16.281	63.508	8345.372	78
350	0.706	16.281	74.093	6128.993	78
400	0.706	16.281	84.677	4690.478	78

Tabel 5. Hasil perhitungan rangkaian LC Tank untuk variasi frekuensi operasi

Frekuensi f (KHz)	Induktansi rangkain L_w (μ H)	Kapasitansi eksternal R (pF)	Karakteristik resistansi ρ (Ohm)
150	33.69	33417.167	31.751
200	33.69	18797.156	42.335
250	33.69	12029.823	52.920
300	33.69	8354.044	63.504
350	33.69	6137.665	74.088
400	33.69	4699.150	84.672

Tabel 6. Hasil perhitungan induktansi koil tanpa pitch dengan variasi frekuensi operasi

Frek. operasi f (KHz)	Induktansi L_c (μ H)	Kapasitansi C (pF)	Frek. Resonansi f_r (MHz)	ESR (Ohm)	Faktor Q
150	62.776	8.64	5.68	0.356	166
200	62.776	8.64	5.68	0.420	188
250	62.776	8.64	5.68	0.474	208
300	62.776	8.64	5.68	0.524	226
350	62.776	8.64	5.68	0.570	242
400	62.776	8.64	5.68	0.616	256

Tabel 7. Hasil perhitungan parameter koil tanpa pitch untuk variasi frekuensi operasi

Frek. operasi f (KHz)	Panjang lilitan l (m)	Panjang konduktor koil l_c (m)	Reaktansi koil R_w (Ohm)	Kapasitansi eksternal C_w (pF)	Jumlah Lilitan koil (N)
150	0.710	22.51	59.165	17924.756	107
200	0.710	22.51	78.887	10078.867	107
250	0.710	22.51	98.608	6447.341	107
300	0.710	22.51	118.33	4474.66	107
350	0.710	22.51	138.052	3285.196	107
400	0.710	22.51	157.773	2513.188	107

Tabel 8. Hasil perhitungan rangkaian LC Tank untuk variasi frekuensi operasi

Frek. operasi f (KHz)	Induktansi rangkaian L_w (μ H)	Kapasitansi eksternal R (pF)	Karakteristik resistansi ρ (Ohm)
150	62.776	17933.461	59.165
200	62.776	10087.572	78.887
250	62.776	6456.046	98.608
300	62.776	4483.365	118.33
350	62.776	3293.901	138.052
400	62.776	2521.893	157.773

Faktor Q kapasitor yang dikenal sebagai faktor kualitas merupakan nilai yang mewakili efisiensi kapasitor dalam hal kehilangan energi. Dalam sistem AC, faktor Q mewakili rasio energi yang tersimpan dalam kapasitor terhadap energi

yang dikeluarkan sebagai kerugian panas dalam ESR. Karena Q adalah ukuran efisiensi, kapasitor ideal akan memiliki nilai Q yang tak terbatas yang berarti bahwa tidak ada energi yang hilang dalam proses penyimpanan energi. Ini berasal dari fakta bahwa ESR kapasitor ideal sama dengan nol.

Faktor Q merupakan salah satu karakteristik kapasitor paling penting dalam desain sirkuit RF. Pada frekuensi RF, ESR meningkat seiring peningkatan frekuensi yang disebabkan efek kulit. Seiring dengan peningkatan ESR, kerugian disipatif juga meningkat. Inilah sebabnya mengapa sirkuit RF biasanya menggunakan kapasitor Q tinggi untuk mengurangi rugi-rugi frekuensi tinggi.

Seperti ditunjukkan pada Tabel 4 dan 7, jumlah lilitan koil berbeda cukup signifikan untuk perancangan koil dengan *pitch* dan tanpa *pitch*. Demikian juga untuk nilai induktansi, reaktansi dan kapasitansi dari koil. Hal ini disebabkan jumlah lilitan yang berbeda cukup jauh. Tetapi untuk kapasitansi eksternal pada rangkaian *RC tank*, koil tanpa *pitch* memiliki nilai yang lebih kecil seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan 8.

V. KESIMPULAN

Telah dilakukan perancangan koil pemanas induksi menggunakan konduktor tembaga. Dari hasil perhitungan diperoleh jumlah lilitan koil 78 dan 107 untuk koil dengan *pitch* dan tanpa *pitch* secara berurutan. Kebutuhan konduktor tanpa *leads* adalah 16,28 dan 22,51 m untuk koil dengan *pitch* dan tanpa *pitch* secara berurutan. Sedangkan untuk frekuensi operasi optimal sangat tergantung dari ukuran, bentuk benda kerja dan temperatur. Walaupun demikian frekuensi operasi dengan ESR rendah dan faktor Q yang tinggi menjadi acuan sehingga operasi yang efisien dengan rugi-rugi yang rendah dapat diperoleh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terimakasih kepada staf Instalasi Elemen Bakar Eksperimental PTBBN – BATAN atas bantuan dan diskusi mereka selama penulisan juga untuk editor dan reviewer atas komentar konstruktif mereka pada tahap awal penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. J. Davies and P. G. Simpson, *Induction Heating Handbook*. Maidenhead, U.K.: McGraw-Hill, 1979.

- [2] D. A. Lazor, "Induction Related Considerations in Investment Casting", Modern Investment Casting Technical Seminar, pp 1-14, Pittsburg USA, March 27-29, 2001.
- [3] K.C. Bala, "Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap", AU Journal of Technology, vol (9), No (2), pp83-88, Oct. 2005.
- [4] P. Dorland, J.D. Wyk, and O.H. Stielau, "On the Influence of Coil Design and Electromagnetic Configuration on the Efficiency of an Induction Melting Furnace", IEEE Trans on IA, Vol. 36, No. 4, July/Aug. 2000.
- [5] Ambrell, "About induction heating", 2017.
- [6] Hastings, B. and Quichenden, C., " Electric Induction Furnace Development and Trends", Metallurgia, vol.50, 1983, pp. 146-150.
- [7] Edgerley, C., "Improvement in the Melting Efficiency of Induction Heating", IEEE conference publication 149, 1977, pp. 28-33.
- [8] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- [9] V. Rudnev, A common misassumption in induction hardening, Heat Treating Progress, Sept. - Oct., p 23-25, ASM Intl., 2004.
- [10] V. Rudnev, Systematic analysis of induction coils failures - Part 2: Effect of current flow on crack propagation, Heat Treating Progress, Sept.- Oct., p 33-35, ASM Intl., 2005.
- [11] Kraus, J.D. and Fleisch, D.A., Electromagnetics with applications, 4th ed, McGraw-Hill International Editions, New York, pp. 552-557, 1999.