

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI ELEKTRON PADA IRADIATOR ELEKTRON PULSA

Anjar Anggraini H., Agus Purwadi, Lely Susita R.M., Bambang Siswanto dan Agus Wijayanto

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

Jl. Babarsari POB 6101 Ykbb, Telp. (0274) 488435, Yogyakarta 55281

email: anjar.ah@batan.go.id

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI ELEKTRON PADA IRADIATOR ELEKTRON PULSA. Telah dilakukan perancangan sistem deteksi arus iradiator elektron pulsa pada Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP) dengan teknik koil Rogowski. Koil Rogowski memiliki kemampuan untuk menangkap medan magnet induksi dari arus listrik, selanjutnya medan magnet induksi akan memberikan tegangan setelah melewati integrator. Diagnostik ini menggunakan perpaduan antara kawat tembaga, ferit dan integrator RC. Rancangan bergantung pada lebar pulsa dan besarnya arus plasma yang melewati koil, dengan demikian jumlah lilitan, luas kumparan dan integrator dapat dirancang. Untuk arus spot plasma (IDPS) yang diharapkan sebesar 10 A dan lebar pulsa 10 μ s maka koil Rogowski menggunakan ferit MnZn dengan induktansi $L = 0,275$ mH dan $\mu_r = 200$ H/m. Untuk arus busur plasma (ADPS) yang diharapkan sebesar 100 A dan lebar pulsa 100 μ s maka koil Rogowski menggunakan induktansi $L=1,9634$ mH dan $\mu_r = 6256$ H/m. Untuk arus elektron pada sistem ekstraksi yang diharapkan sebesar 30 A dan lebar pulsa 100 μ s dengan menggunakan induktansi $L=51,749$ mH dan $\mu_r= 4987$ H/m. Rancangan integrator yang digunakan yaitu jenis integrator RC.

Kata kunci: sistem deteksi, plasma, arus, ferit, integrator

ABSTRACT

DESIGN OF ELECTRON DETECTION SYSTEM FOR PULSE ELECTRON IRRADIATOR. Design of electron detection system for pulse electron irradiator has been conducted on the Plasma Cathode Electron Source by Rogowski coil technique. Rogowski coil has ability to capture the induced magnetic field of the electric current, subsequent induced magnetic field will provide voltage after passing integrator. This diagnostic used combination of copper wire, ferrite and RC integrator. The design depends on the pulse width and the value of plasma current that passes through the coil, thus the number of windings, coil area and integrator can be designed. For plasma spots current of IDPS expected to be 10 A and pulse width 10 μ s the Rogowski coil using MnZn ferrit with inductance $L = 0,275$ mH and permeability $\mu_r = 200$ H/m. For the current of plasma arc ADPS expected to be 100 A and pulse width 100 μ s by using inductance $L=1,9634$ mH and permeability $\mu_r = 6256$ H/m. Electron current in extraction system expected to be 30 A and pulse width 100 μ s the Rogowski coil using inductance $L=51,749$ mH and permeability $\mu_r= 4987$ H/m. Design integrator used is the type of RC integrator.

Keywords: detection system, plasma, current, ferrite, integrator

PENDAHULUAN

Plasma merupakan gas yang terionisasi dalam lucutan listrik dan dapat juga didefinisikan sebagai percampuran kuasinetrals dari elektron, radikal, ion positif dan ion negatif. Percampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dengan elektron-elektron yang bermuatan negatif memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya dan materi pada fase ini disebut fase plasma. Secara sederhana plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai fase materi ke empat setelah fase padat, fase cair dan fase gas [1]. Plasma dapat terjadi secara alamiah di alam atau dapat juga diperoleh dalam laboratorium dengan pemanasan tinggi yang dilakukan secara intensif. Pembentukan plasma pada laboratorium dengan

menaikkan suhu gas di dalam bejana akan menyebabkan tumbukan antar atom-atom sehingga menghasilkan banyak elektron dan ion. Pada suhu tertentu di mana jumlah ion-ion dan elektron-elektron menjadi lebih besar lagi, terbentuklah plasma.

Di Indonesia, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) BATAN sedang mengembangkan penelitian di bidang plasma skala laboratorium. Metode yang digunakan untuk menghasilkan plasma yaitu dengan menggunakan Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP). SEKP merupakan bagian dari iradiator elektron pulsa yang sedang dikembangkan dan bertujuan untuk *treatment* produk pertanian yaitu biji-bijian. Bejana generator plasma yang digunakan untuk menghasilkan plasma terdiri dari dua sistem elektroda yaitu sistem elektroda ignitor dan sistem elektroda generator

plasma. Sistem elektroda ignitor yang menginisiasi lucutan terdiri dari dua buah elektroda ignitor yang dilengkapi dengan dua unit sistem sumber daya ignitor (IDPS) dan sistem deteksi arus spot plasma. Sistem elektroda ignitor terdiri dari katoda, anoda dan isolator antara katoda dan anoda. Sistem elektroda generator plasma sebagai pembentuk plasma dalam bejana plasma dilengkapi dengan dua unit sistem sumber daya generator plasma (ADPS) dan sistem deteksi arus lucutan dan kerapatan plasma. Sistem elektroda generator plasma terdiri dari katoda yang juga sama dengan katoda elektroda ignitor dan anoda yang juga sebagai dinding bejana plasma [2-4].

Dalam SEKP yang telah terhubung dengan tegangan tinggi akan menghasilkan arus lucutan plasma. Pada penelitian sebelumnya, arus lucutan plasma tersebut dapat terdeteksi dengan menggunakan sistem deteksi arus lucutan spot plasma pada sistem elektroda ignitor (IDPS) dan arus lucutan busur plasma sistem elektroda generator plasma (ADPS) dari sistem SEKP. Diagnostik arus sangat penting untuk penelitian plasma. Teknik diagnostik termasuk pengukuran arus dan tegangan, dan pengukuran medan magnet. Sistem deteksi yang digunakan merupakan alat ukur arus alternatif yang paling sederhana dan efektif sebagai alat pengukur arus lucutan busur plasma tidak langsung yaitu dengan teknik koil Rogowski [5]. Diagnostik ini menggunakan peralatan yang dapat dibuat sendiri dalam lingkup laboratorium yaitu dengan menggunakan perpaduan antara kawat tembaga, ferit dan integrator RC. Perancangan sistem deteksi arus dengan menggunakan koil Rogowski pada iradiator elektron pulsa sistem SEKP di perlukan untuk mengetahui arus IDPS, arus ADPS dan arus elektron hasil ekstraksi yang keluar dari bejana SEKP menuju bahan yang akan di *treatment*.

TEORI

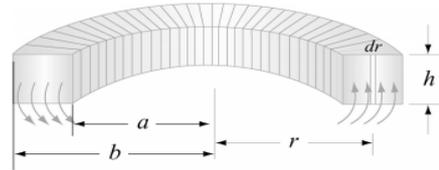
Pada tahun 1912, Rogowski dan Steinhaus membuat sensor koil Rogowski berbentuk helix seragam yang dililitkan melingkar sepanjang bahan non magnetik [10-12]. Koil Rogowski diambil dari nama Walter Rogowski, koil tersebut digunakan untuk mengubah fluks yang diterima alat menjadi tegangan melalui pengukuran arus *non intrusive* [11]. Prinsip dasarnya yaitu menangkap medan magnet induksi dari arus listrik yang dihasilkan oleh elektron yang melaluinya. Arus berkas tersebut berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday dipengaruhi oleh permeabilitas bahan, jumlah lilitan, dan luas permukaan yang berintikan ferit berbentuk toroid. Koil Rogowski memiliki fitur rentang pengukuran yang luas, kecepatan reaksi yang cepat, struktur isolasi sederhana, dll. Koil Rogowski terbuat dari kawat tembaga mengelilingi bahan non-magnetik seragam, sehingga memiliki sensitivitas tinggi, yang

membuatnya rentan terhadap gangguan medan magnet eksternal. Hubungan antara induksi GGL Rogowski koil dan arus yang melewatinya adalah sebagai berikut [6, 7]:

$$E(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$i(t)$ didapatkan melalui integral tegangan output dari Rogowski koil.

Pada Gambar 1 ditampilkan penampang toroid koil Rogowski



Gambar 1. Penampang toroid untuk koil Rogowski

Medan magnet yang timbul di dalam rangkaian tertutup (toroid) dihitung dengan menggunakan hukum Ampere berbentuk integral tertutup yaitu:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B ds = B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_o NI \quad (2)$$

Secara sederhana medan magnetnya menjadi [9]:

$$B = \frac{\mu_o NI}{2\pi r} \quad (3)$$

Fluks magnet yang melewati satu lilitan toroid dapat dijelaskan dengan integral penampang, dimana $dA = h dr$ sebagai area yang dideferensialkan :

$$\phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_a^b \left(\frac{\mu_o NI}{2\pi r} \right) h dr = \frac{\mu_o NI h}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad (4)$$

Fluks magnet total pada rangkaian adalah $N\phi_B$, sehingga induktansi diri yang timbul pada koil Rogowski adalah:

$$L = N \frac{\phi_B}{I} = \frac{N \mu_o NI h}{2\pi I} \ln \left(\frac{b}{a} \right) = \frac{\mu_o N^2 h}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad (5)$$

Induktansi diri (L) hanya bergantung pada faktor geometri, dengan menganggap $a \gg b-a$, sehingga induktansi diri dalam koil dapat disederhanakan melalui persamaan berikut:

$$L \approx \frac{\mu_o N^2 h}{2\pi} \frac{b-a}{a} = \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi a} \quad (6)$$

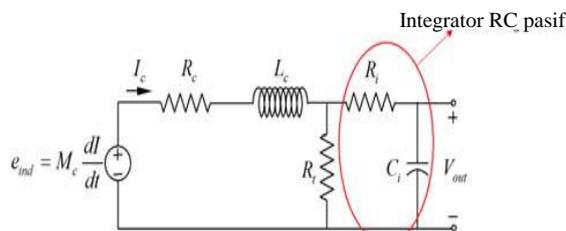
Berdasarkan persamaan (6) faktor yang mempengaruhi induktansi diri adalah permeabilitas ruang hampa μ_o ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m), jumlah lilitan sebanyak N dan luas penampang A .

Tegangan luaran koil dirumuskan sebagai laju perubahan fluks:

$$V_{luarankoil} = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{\mu_o n A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

Terlihat pada persamaan (7) bahwa tegangan luaran koil sebanding dengan perubahan arus $\frac{dI}{dt}$, sehingga untuk menentukan besarnya arus $I(t)$ maka tegangan luaran koil harus diintegrasikan [4]. Dengan demikian tampak bahwa tegangan luaran koil Rogowski di samping tergantung pada besarnya arus, juga tergantung kepada jumlah lilitan, luas permukaan koil dan jarak dari sumbu arus [5]. Rangkaian integrator RC pada koil untuk memberikan tegangan yang mereproduksi bentuk gelombang arusnya seperti diperlihatkan Gambar 2, maka persamaan (7) menjadi:

$$V_{\text{luarankoil}} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_o n A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} = \frac{\mu_o n A}{2\pi r} \frac{I}{RC} \quad (8)$$



Gambar 2. Rangkaian setara koil Rogowski dengan integrator pasif [5]

Nilai permeabilitas toroid dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (6) sehingga persamaannya menjadi [9]:

$$\mu_r = \frac{2\pi r L}{\mu_o N^2 A} \quad (9)$$

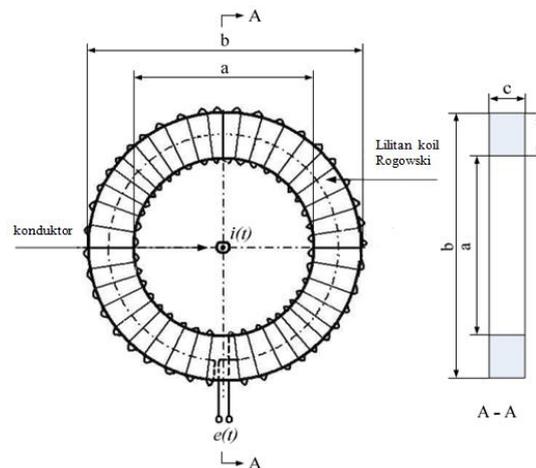
METODOLOGI

Perancangan sistem deteksi yang akan digunakan untuk SEKP yaitu menggunakan teknik koil Rogowski berbentuk toroid yang diberi lilitan kawat tembaga. Koil Rogowski dipasang pada kabel keluaran IDPS untuk mengukur arus plasma, dan juga dipasang pada kabel keluaran ADPS untuk menentukan arus plasma lucutan busur, serta dipasang pada keluaran sistem ekstraksi yang akan menghasilkan arus elektron pulsa. Sebelum tegangan dari masing-masing catudaya IDPS dan ADPS dipasang, bejana generator plasma dihampakan menggunakan sistem vakum hingga mencapai derajat kehampaan sekitar orde 10^{-4} mBar [5, 13].

Dalam pengukuran arus spot plasma sistem IDPS diharapkan memiliki spesifikasi pulsa tegangan keluaran 10 kV dengan lebar pulsa sekitar 10 μ s. Pengukuran lucutan busur sistem ADPS menghasilkan pulsa tegangan keluaran sekitar 1 kV dengan lebar pulsa sekitar 100 μ s, serta pada sistem ekstraksi menghasilkan pulsa tegangan 200 kV dengan lebar pulsa 100 μ s.

Pengukuran dimensi ferit dan kawat tembaga dapat dilakukan dengan bantuan alat ukur jangka

sorong. Kawat dililitkan melingkar pada ferit secara teratur [9, 14] dan nilai induktansi yang dihasilkan koil dapat dipastikan dengan menggunakan alat LCR meter yang disajikan seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4



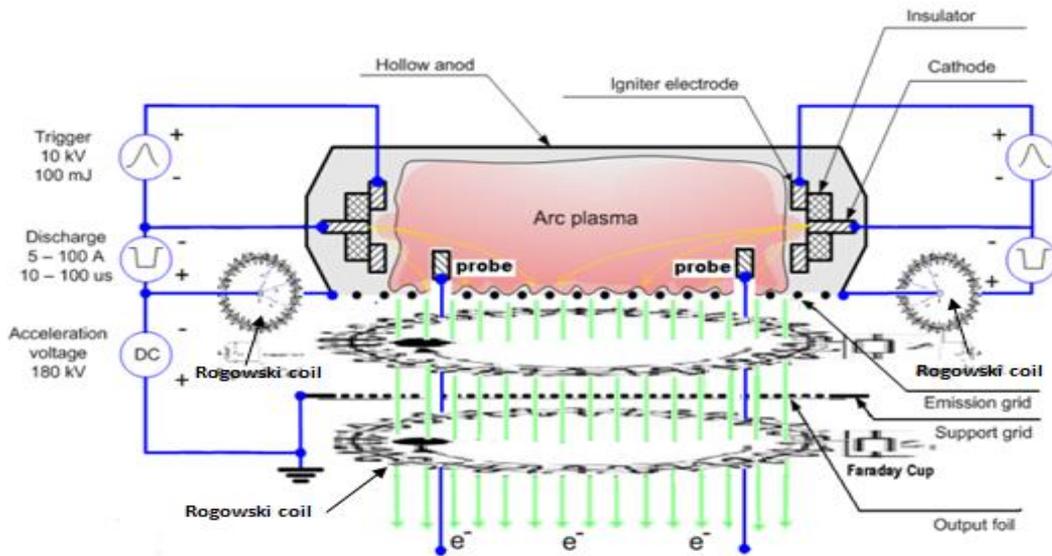
Gambar 3. Rancangan koil Rogowski [14]

Pengukuran nilai induktansi menggunakan LCR meter jenis GW instek LCR-816. LCR meter tersebut akan menampilkan beberapa parameter yaitu induktansi (L), resistansi (R) dan kapasitansi (C), serta beberapa menu penunjang yaitu *speed*, *display*, *mode* dan *circuit*. Nilai induktansi yang dapat diukur yaitu antara 1 mH hingga 1 H. Dalam pengukuran induktansi menggunakan *speed slow* dengan keakuratan 0,05% tiap pengukuran per sekon, *display value*, *mode R/Q* dan *circuit series* dikarenakan resistor yang di ukur didalam koil Rogowski memiliki nilai resistansi yang rendah yaitu dibawah 1 k Ω .



Gambar 4. Pengukuran koil Rogowski dengan LCRmeter

Arus lucutan dari generator plasma serta arus elektron yang ditarik tegangan pemercepat dideteksi menggunakan koil Rogowski. Pada sistem SEKP tipe DUET seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Tabel 1 ditampilkan spesifikasi koil Rogowski yang akan digunakan sebagai sistem deteksi SEKP.



Gambar 5. Sumber elektron sistem dua sumber “DUET” [5]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Spesifikasi koil Rogowski berinti ferit bentuk toroid

No	Spesifikasi koil Rogowski	Simbol	Dimensi Rogowski (IDPS)	Dimensi Rogowski (ADPS)	Dimensi Rogowski (Ekstraksi)
1.	Diameter luar	$\varnothing_{\text{luar}}$	23,49 mm	29 mm	29 mm
2.	Diameter dalam	$\varnothing_{\text{dalam}}$	13,23 mm	23 mm	23 mm
3.	Diameter tengah	$\varnothing_{\text{tengah}}$	18,36 mm	26 mm	26 mm
4.	Tebal toroid	h_t	9,71 mm	17 mm	17 mm
5.	Lebar toroid	L_t	5 mm	3 mm	3 mm
6.	Jari-jari toroid	r_{toroid}	9,18 mm	13 mm	13 mm
7.	Diameter kawat	$\varnothing_{\text{kawat}}$	0,2 mm	0,2 mm	0,5 mm
8.	Jari-jari kawat	r_t	0,1 mm	0,1 mm	0,25 mm

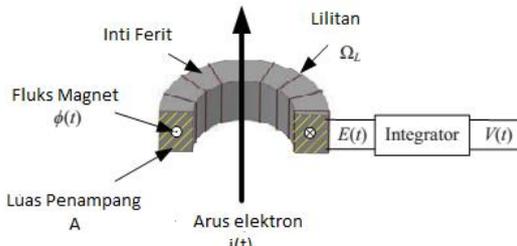
Tabel 2. Parameter hasil perhitungan koil Rogowski

No	Spesifikasi koil Rogowski	Simbol	Dimensi Rogowski (IDPS)	Dimensi Rogowski (ADPS)	Dimensi Rogowski (Ekstraksi)
1.	Jumlah lilitan.	N	36	20	115
2.	Luas tampang koil Rogowski.	A_{KR}	48,55 mm ²	51 mm ²	51 mm ²
3.	Permeabilitas relatif.	μ_r	200	6256	4987
4.	Permeabilitas udara.	μ_o	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m
5.	Induktansi toroid terukur.	L	$0,275 \times 10^{-3}$ H	$1,963 \times 10^{-3}$ H	$51,749 \times 10^{-3}$ H
6.	Integrator pasif.	R dan C	R= 200 Ω ,C= 0,22 μ F	R= 200 Ω , C= 2,2 μ F	R= 200 Ω , C= 2,2 μ F

Perancangan sistem deteksi menggunakan bahan yang terbuat dari toroid ferrit, kawat tembaga dan integerator RC pasif. Integrator digunakan agar koil dapat menangkap arus output dengan kinerja yang lebih tinggi, sehingga menggunakan induktansi diri

untuk integrasi pasif. Hal tersebut sesuai hukum Faraday pada persamaan (1), arus elektron $i(t)$ menghasilkan fluks magnet $\phi(t)$ pada luas penampang yang diberi lilitan kawat. Akibatnya fluks magnet $\phi(t)$ menginduksi gaya gerak listik $E(t)$, dimana $E(t)$

nilainya sebanding dengan diferensial i arus primer sehingga perlu adanya integrator RC pasif untuk sistem deteksi. Hal tersebut akan menyebabkan tegangan yang keluar dari kumparan setelah melewati integrator berbanding lurus dengan arus, jumlah lilitan, luas permukaan koil dan berbanding terbalik dengan jarak sumbu arus dengan sumbu koil serta komponen integratornya.



Gambar 6. Koil Rogowski dengan menggunakan integrator [8]

Toroid yang digunakan dalam perancangan terbuat dari bahan ferit dengan berbagai macam kode warna. Ferit sendiri proses produksinya dengan cara mengolah komposisi oksida besi yang dicampur dengan bahan utama lainnya seperti oksida atau karbonat baik Mn-Zn atau Ni-Zn. Proses tersebut merupakan proses dasar yang paling umum untuk teknologi proses keramik dan dapat dibagi menjadi empat proses utama yaitu *powder preparation, forming, sintering* dan *finishing*.

Ferit lunak merupakan klasifikasi bahan ferit berdasarkan spinel dan struktur kristal kubik. Bahan tersebut diproduksi dalam dua kategori material yaitu Mn-Zn dan Ni-Zn. Jenis ferit lunak Mn-Zn merupakan ferit yang paling umum digunakan pada berbagai macam aplikasi dibandingkan dengan ferit Ni-Zn. Hal tersebut dikarenakan Mn-Zn meliputi variasi material yang lebih luas. Serbuk ferit Mn-Zn memiliki sifat *soft magnetic* yang baik karena magnetisasi maksimumnya tinggi sehingga perubahan karakteristik intrinsik magnet dapat terjadi dalam waktu singkat apabila ada gangguan dari luar (mudah dimagnetisasi dan didemagnetisasi). Ferit Mn-Zn digunakan terutama untuk frekuensi kurang dari 2 MHz [15]. Komposisi dari ferit Mn-Zn memberikan kinerja optimal untuk kerapatan fluks saturasi (B_s), *low losses* (Q) dan permeabilitas awal yang tinggi (μ_i).

Ferit lunak Ni-Zn merupakan bahan yang tinggi resistivitasnya, beberapa kali lipat lebih tinggi dari Mn-Zn ferit. Karena resistivitasnya yang tinggi, ferit Ni-Zn merupakan bahan yang dapat beroperasi dari 1-2 MHz hingga beberapa ratus megahertz [15].

Ferit yang sesuai dalam perancangan sistem deteksi SEKP adalah inti (*core*) toroid dari bahan ferromagnetik besi lunak Mn-Zn yang memiliki nilai permeabilitas antara orde dua hingga orde tiga (Tabel

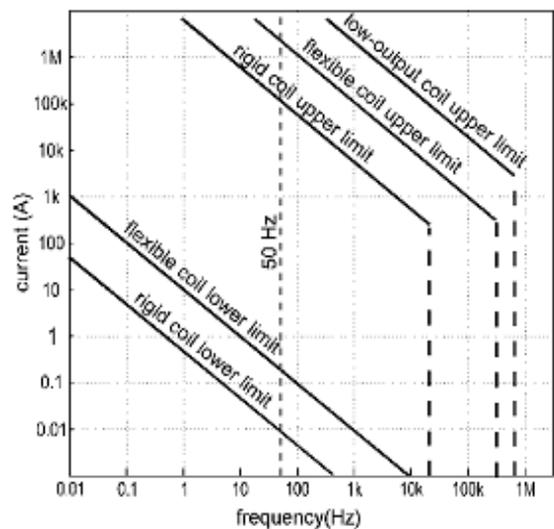
2) dengan berbagai macam keuntungan yaitu kinerja optimal pada fluks saturasi (B_s), *low losses* (Q) dan permeabilitas awal yang tinggi (μ_i). Dengan demikian, nilai induktansi lebih besar dan jumlah lilitan yang lebih sedikit, dimana dimensi toroid lebih kecil dan disesuaikan dengan frekuensi kerja SEKP yaitu sekitar 50 Hz.

Tabel 3. Pemanfaatan ferit [16]

No.	Pemakaian	Nama bahan	Keterangan
1.	Frekuensi tinggi/menengah a. gelombang radio b. telekomunikasi c. pesawat tv	Ferit Ni-Zn & Cu-Zn-Mg Ferit Mn-Zn Ferit Mn-Zn	μ_r tinggi, Ph dan Pe kecil
2.	Memori magnetik Komputer	Ferit Mn-Zn	Grafik histerisis persegi
3.	Gelombang mikro (penyerap gelombang radio, isolator, sirkulator)	Ferit Mn-Zn	
4.	Magnetrostriksi supersonik	Ferit Mn-Zn	
5.	Kepala magnetik	Ferit Mn-Zn	
6.	Sensor suhu	Ferit Mn-Zn	
7.	Pemercepat partikel	Ferit Mn-Zn	Frekuensi dan daya tinggi

Toroid yang menggunakan inti (*core*) melingkar, medan induksinya tertutup dan relatif tidak menginduksi komponen lain yang berdekatan. Permeabilitas bahan dapat diketahui dengan kode warna tertentu, misalnya abu-abu, hitam, merah, biru dan kuning. Lapisan tersebut bukan hanya sekedar warna yang membedakan permeabilitasnya, tetapi juga berfungsi sebagai pelapis atau isolator.

Pada Gambar 7 terlihat bahwa koil Rogowski yang digunakan pada frekuensi 50 Hz dan arus sekitar 30 A memiliki batas operasi antara koil fleksibel batas bawah hingga koil keras batas atas.



Gambar 7. Batas operasi koil Rogowski [15]

Kawat yang digunakan untuk koil Rogowski adalah kawat tembaga, karena lilitan tembaga dapat membantu medan magnet terkumpul dengan kuat di dalam kumparan mengingat hukum induksi Faraday. Selain itu tembaga merupakan konduktor yang sangat baik dari arus listrik sebagai penghantar arus (*ampacity*) yang lebih baik dari aluminium. Empat logam konduktor utama yang sering digunakan adalah aluminium, tembaga, emas dan perak. Dari keempat bahan tersebut, tembaga yang paling murah, memiliki resistivitas logam paling rendah tetapi perak lebih ideal untuk digunakan di ruang terbatas, dengan luas penampang yang lebih kecil dari tembaga dapat digunakan untuk arus yang sama, ditambah resistensi DC nya sangat rendah. Tembaga juga lebih fleksibel daripada aluminium, mudah tersedia dan cukup tahan terhadap korosi. Kumparan induktor yang terbuat dari emas atau perak kurang ekonomis.

Daya hantar yang dimiliki tembaga 100% IACS (*International Annealed Copper Standard*) yang lebih tinggi dari Aluminium (Al) [16]. Tahanan jenis maksimum tembaga juga lebih kecil dibandingkan aluminium, dengan tahanan jenis yang lebih kecil sehingga tembaga memiliki daya hantar yang besar. Dengan demikian, saat digunakan sebagai sistem deteksi dapat menangkap elektron yang melaluinya dan dapat terbaca pada alat pengukuran.

Tabel 4. Perbandingan sifat penghantar [16]

No.	Sifat	Tembaga (Cu)	Aluminium (Al)
1.	Kemurnian minimum	99,9%	99,5%
2.	Tahanan jenis maksimum	0,01724 Ω -mm ² /m	0,028926 Ω -mm ² /m
3.	Daya hantar	100% IACS	61% IACS
4.	Berat jenis	8,9 kg/dm ³	2,7 kg/dm ³

Arus dari alat berupa sinyal pulsa dari SEKP yang masuk kedalam sistem deteksi, agar mudah terbaca oleh osiloskop maka diperlukan penguat masukan sinyal berupa integrator. Pada frekuensi rendah yaitu antara 10 Hz hingga 100 kHz, terjadi penguatan kurang dari 1, dimana fase outputnya berhimpitan dengan input. Integrator yang digunakan dalam perancangan sistem deteksi ini menggunakan integrator RC pasif sesuai dengan frekuensi yang diharapkan. Sumber AC dengan tegangan $V_{in}(t)$ memberi masukan ke rangkaian seri RC. Output merupakan tegangan kapasitor. Dengan menganggap frekuensi tinggi $\omega \gg 1/RC$, maka kapasitor memiliki waktu cukup untuk mengisi tegangan kecil, sehingga tegangan input hampir sama dengan tegangan resistor.

Untuk mempermudah analisis, maka dapat diasumsikan bahwa diameter penampang koil Rogowski yang dirancang jauh lebih kecil dari jari-jarinya, $i(t)$ berpusat di dalam koil Rogowski, luas

penampang koil Rogowski seragam sepanjang inti, lilitan yang melingkari inti harus seragam.

Dengan demikian rancangan sistem deteksi untuk sistem SEKP pada arus spot plasma (IDPS) dengan $I=10$ A, $V=10$ kV, $\tau=10\mu s$ menggunakan ferit $r_{toroid} = 9,18$ mm = $9,18 \times 10^{-3}$ (m), kawat tembaga dengan diameter $\phi_{kawat} = 0,2$ mm = 2×10^{-4} (m), jumlah lilitan $N=36$, induktansi $L=0,275$ mH dan $\mu_r=200$ H/m. Rancangan sistem deteksi untuk arus busur plasma (ADPS) dengan $I=100$ A, $V=1$ kV, $\tau=100\mu s$ menggunakan ferit $r_{toroid} = 13$ mm = 13×10^{-3} (m), kawat tembaga berdiameter $\phi_{kawat} = 0,2$ mm = 2×10^{-4} (m), jumlah lilitan $N=20$, induktansi $L=1,9634$ mH dan $\mu_r=6256$ H/m. Sedangkan rancangan sistem deteksi pada sistem ekstraksi dengan $I=30$ A, $V=200$ kV, $\tau=100\mu s$ dengan menggunakan ferit $r_{toroid} = 13$ mm = 13×10^{-3} (m), $\phi_{kawat} = 0,5$ mm = 5×10^{-4} (m), jumlah lilitan $N=115$, induktansi $L=51,749$ mH dan $\mu_r=4987$ H/m. Integrator yang digunakan menggunakan resistor $R=200\Omega$ dan kapasitor $C=2,2\mu F$ dan $0,22\mu F$.

KESIMPULAN

Berbagai macam desain yang berbeda dari koil Rogowski yang telah dianalisis, maka sistem deteksi yang dirancang menggunakan bahan yang terbuat dari toroid ferrit Mn-Zn, kawat tembaga dan integrator RC pasif. Integrator digunakan agar koil dapat menangkap arus output dengan kinerja yang lebih tinggi, sehingga menggunakan induktansi diri untuk integrasi pasif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan ini kami sebagai penulis makalah mengucapkan terima kasih kepada Bapak Kepala PSTA-BATAN yang telah mengalokasikan dana penelitian dari DIPA-PSTA 2015 sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada tim SEKP yang telah membantu dalam perancangan sistem deteksi menggunakan teknik koil Rogowski. Semoga segala bantuan Bapak/Ibu/Saudara mendapat balasan dari Allah SWT, Amin.

DAFTAR PUSTAKA

1. Nur, Muhammad, *Fisika Plasma dan Aplikasinya*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
2. SUDJATMOKO, *Rancang Bangun Sumber Elektron Katoda Plasma*, Proposal Program Insentif Proliptek, 2012.
3. EFIM OKS, *Lecture 8: Introduction of Plasma Cathode Electron Source*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia, December 5th -9th, 2011.
4. Lely Susita R.M., *Pemilihan Jenis Material Elektroda Sumber Elektron Katoda Plasma*, Pusat

- Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Yogyakarta, 2012.
5. Wirjoadi, dkk, *Rancangan Sistem Deteksi Arus Lucutan Plasma*, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Yogyakarta, 2012.
 6. Yuan Jing, Wang Yutian, *Design and research of fiber optically powered Rogowski coil current transformer*, The College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, 2011.
 7. S. Al-Sowayan, *Improved Mutual Inductance of Rogowski Coil Using Hexagonal Core*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:8, No:2, 2014.
 8. Tao Ma, dkk, *Rogowski Coil for Current Measurement in a Cryogenic Environment*, Measurement Science Review, Volume 15, No. 2, China, 2015.
 9. Putra, Adhitya I., *Analisa Karakteristik Induktor Toroid Pada Rangkaian Boost Converter*, Universitas Indonesia, Depok, 2012.
 10. Slawomir Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, CRC Press, ISBN 1-439-82952-7, p. 174, 2011.
 11. Chauhan, S., Prakash, R., Singh, DBV., *Design and Analysis of Rogowski Coil Sensor for Plasma Current Measurement*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 5, May 2013.
 12. Harry, I.H., *Review of AC (small) Current Measurement Techniques*, International Journal of Electrical and Power Engineering 7 (2): 27-37, 2013.
 13. Wirjoadi, dkk, *Penentuan Arus Spot Plasma dan Arus Plasma Lucutan Busur Pada Sistem Sumber Elektron Katode Plasma Menggunakan Teknik Koil Rogowski*, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Yogyakarta, 2015.
 14. Zang, Ming, dkk, *Design And Test Of A New High-Current Electronic Current Transformer With A Rogowski Coil*, Metrology And Measurement Systems, China, 2014.
 15. Magnetic Materials Producers Association, *Soft Ferrit*, MMPA Soft Ferrite Division, Chicago, 1998.
 16. Suyamto, *Fisika Bahan Listrik*, Pustaka Pelajar, Yogyakarta, 2009.

TANYA JAWAB

Tjipto Sujitno

- Bagaimana cara membuat toroida rapi (ukuran/jarak tiap lilitan sama)?

Anjar Anggraini H

- Dengan menggunakan mesin untuk melilit solenoid atau toroid, akan tetapi kurang ekonomis, sehingga dapat menggunakan lilin untuk merapkannya

Silakhuddin

- Bagaimana cara mengkalibrasi arus elektron yang terdeteksi di coil?

Anjar Anggraini H

- Dibandingkan hasil dari faraday cup dan koil rogowski yang dibuat oleh pabrik atau yang telah jadi.