

LUCUTAN PLASMA BENTUK TORUS

Widdi Usada, Suryadi, Agus Purwadi, Kasiyo
Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta

ABSTRAK

LUCUTAN PLASMA BENTUK TORUS. Telah dibuat sebuah perangkat sistem lucutan plasma bentuk torus sebagai awal penelitian plasma dengan sistem pengungkungan magnetik. Sistem ini terdiri dari sebuah kapasitor, sumber RF, sistem transmisi arus, sistem pemacu, kumparan primer dan torus, dilengkapi dengan probe rogowski sebagai sistem deteksi arus. Pada sistem tersebut di atas terjadi lucutan pada tegangan operasi terendah sebesar 5 kV. Hasil percobaan menunjukkan nilai faktor kopling sistem sebesar 0.35, juga ditunjukkan ada kesamaan hasil induktansi primer antara perkiraan dengan pengukuran yaitu sekitar 8.5 μ H.

ABSTRACT

PLASMA DISCHARGE IN TOROIDAL SYSTEM. A toroidal discharge apparatus has been made as an initial research in magnetic confinement system. This system consists of a capacitor, a RF source, an igniter system, a primary coil, a torus, and completed by Rogowsky probe as a current detector. In this system, the discharge occurs when the minimum voltage is operated at 5 kV. The experiment result shows that the coupling factor is 0.35, it is proved that there is an equality between estimated and measurement results of the primary inductance i.e 8.5 μ H.

PENDAHULUAN

Penduduk, energi dan lingkungan merupakan problem besar yang akan dihadapi di masa mendatang. Permintaan dan gaya hidup yang berlebihan, kemiskinan serta penambahan penduduk sumber utama kerusakan lingkungan. Permintaan dan gaya hidup berlebihan mendukung pertumbuhan sektor industri di berbagai bidang sedemikian besar seperti industri otomotif, perkayuan, kimia dan lain sebagainya. Kemiskinan dan keterbelakangan mendukung ketidak-efisienan dalam pemanfaatan lahan akan berdampak besar pada kerusakan tanah dan kandungan air tanah. Pertambahan penduduk jelas akan membutuhkan konsumsi energi serta fasilitas lain yang berakibat pada eksploitasi besar-besaran sumber-sumber alam yang ada.

Konsumsi energi dunia dewasa ini sekitar 52 EJ ($1\text{ EJ}=10^{18}\text{ J}$)⁽¹⁾ dan bila laju kenaikan konsumsi energi sekitar 4%, dan bahan bakar minyak yang cadangannya tinggal 1200 EJ dikonsumsi terus menerus maka sekitar tahun 2008 dunia akan menghadapi krisis energi yang sangat besar, terutama bila dalam dekade mendatang sumber-

sumber energi alternatif belum muncul atau belum diterima masyarakat dunia.

Problem Penduduk dan Energi akan mengarah pada eksploitasi sumber-sumber alam secara tak terkendali, sehingga disamping manusia yang menjadi korban, alam tempat bernaung dan berpijakpun akan menjadi korban, seperti kerusakan tanah, kandungan air tanah kosong, penghangatan bumi, hujan asam dan lain sebagainya.

Usaha-usaha pengereman eksploitasi sumber-sumber alam dan akibatnya telah dirintis oleh PBB melalui puslit-puslit, universitas dan para cendekiawan lingkungan. Dalam Konferensi Lingkungan dan Pembangunan di Rio de Janeiro, Juni 1992, yang dikenal pula dengan KTT Bumi, para ilmuwan sepakat bahwa dalam membangun perlu dipahami konsep "Pembangunan Yang Berkelanjutan" dengan menyadari bahwa Manusia sebagai Pusat Pembangunan dan Kita Saat ini Peminjam Bumi dari Anak Cucu Kita. Jadi konsep "Pembangunan Berkelanjutan" juga merupakan "Pembangunan Yang Terkendali" atau dengan meminjam istilah yang populer dewasa ini "Pembangunan Yang Berwawasan Lingkungan"⁽²⁾. Dengan memahami konsep tersebut, adalah tidak

mungkin adanya pembangunan tanpa batas, tetapi pembangunan yang berada dalam keterbatasan, sehingga manusia sebagai pelaku pembangunan haruslah hidup dalam keterbatasan pula. KTT Bumi yang menelorkan Deklarasi Rio yang terkenal dengan Agenda 21 tersebut memperkokoh usaha-usaha pentingnya pembangunan global dan kompak untuk menyalurkan kebutuhan manusia dan alamnya.

Jauh sebelum KTT Bumi, dalam pertemuan di Geneva, tahun 1985⁽³⁾ Presiden Michael S. Gorbachev dan Presiden Ronald Reagan membahas berbagai topik masalah dunia seperti sistem pertahanan strategis, pengendalian persenjataan, Hak-Hak Azasi Manusia serta kerjasama dalam sains dan teknologi. Kedua pemimpin tersebut memandang perlu adanya kerjasama untuk membangun reaktor fusi untuk kepentingan umat manusia. Pemilihan fusi sebagai sumber energi terbaik setelah matahari untuk masa mendatang cukup memenuhi kriteria pembangunan berwawasan lingkungan, karena bahan bakar dengan kandungan tak terbatas, tingkat keselamatan tinggi karena dapat dihentikan setiap saat (aman) dan tidak menghasilkan polusi, nilai Q (energi keluaran/masukan) tinggi. Meskipun demikian kendala tetap muncul diantaranya faktor biaya tinggi, derajat kebutuhan teknologi juga tinggi dan masih ada faktor lain diperlukannya pengendalian reaksi neutron dengan bahan-bahan sekitar secara seksama.

Seperti telah diketahui⁽⁴⁾ bahwa tokamaklah akan menjadi konsep reaktor fusi di masa mendatang. Sebagai jawaban dari pernyataan kedua pemimpin tersebut para ilmuwan dan insinyur dari berbagai negara yang kuat dalam program fusi seperti negara Masyarakat Eropa, Jepang, Negara Persemakmuran Merdeka dan Amerika pada tahun 1987 menyetujui memulai kerjasama untuk mendesain peralatan eksperimental fusi dan disepakati bernama *International Thermonuclear Experimental Reactor* yang disingkat ITER, suatu program yang membentuk landasan baru yang dapat disebut "Proyek Sains Spektakuler", dengan konsep internasional murni, yang akan menunjukkan suatu paradigma baru dalam proyek ilmiah berskala besar.

Kata Tokamak yang berasal dari bahasa Rusia berarti kamar berbentuk torus yang diberi magnet, yang berarti ada gas dalam tabung torus yang menjadi plasma dan dikungkung dengan medan magnet. Oleh karena itu sistem tokamak merupakan transformator dengan kumparan primer

yang memberikan induksi sehingga gas yang ada dalam torus sebagai sekundernya akan mengalami lucutan. Untuk menjaga kestabilan maka pada sistem tersebut dilengkapi dengan medan toroidal, medan vertikal dan medan poloidal. Diawali dengan kemajuan besar yang dicapai JET (Tokamak terbesar dunia saat itu hasil konsorsium negara-negara masyarakat Eropa yang menjelang tahun 1992 telah mencapai "breakeven") dengan daya keluaran sebesar 1 MW, kemudian menjelang akhir tahun 1993 di harian Kompas juga dilaporkan kemajuan sangat besar dicapai grup TFTR Princeton, Amerika yang memperoleh daya 5.6 MW saat digunakannya bahan bakar DT, namun dalam *Fourteenth International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion Research* yang diselenggarakan IAEA di Wurzburg, Jerman, Oktober 1992, grup TFTR telah melaporkan kesuksesan mereka saat digunakannya bahan bakar DD, dan telah disimulasikan pula diperolehnya neutron yield sebesar 10^{17} bila digunakan bahan bakar DT. Diperkirakan daya yang akan dicapai TFTR musim panas 1993 diperoleh sekitar 12 MW, sedangkan grup TFTR mentargetkan diperolehnya daya 30 MW. Jadi bila yang dicapai tersebut hanya sebesar di atas, maka baru separo dari yang diperkirakan atau seperlima dari target. Jepang yang juga salah satu grup kuat dalam program fusi dengan Tokamak JT60 sejauh ini juga telah melaporkan kesuksesan perolehan energi yang cukup besar.

Diilhami dengan kesuksesan tersebut di atas, maka keyakinan diperolehnya reaktor fusi akan semakin kuat, khususnya ITER yang 8 tahun mendatang akan selesai. Kemampuan ITER yang diharapkan memperoleh daya fusi sebesar 1 GW (200 kali hasil yang dicapai TFTR) juga diharapkan mempunyai nilai Q sebesar 50, dengan biaya total sebesar US\$ 7.5 milyar. Tokamak ITER berbentuk kue donat dengan tampang lintang eleptik berbentuk huruf D berukuran lebar 4.3 m, tinggi 8.4 m, jari-jari mayor 6 m, maka volumenya sekitar 120 m^3 . Untuk mendapatkan daya sebesar 1 GW, neutron yield yang diperlukan sekitar 5×10^{18} . Untuk memperoleh yield yang sangat besar diperlukan kualitas pengungkungan sebesar $2 \times 10^{24} \text{ eVdet.cm}^{-3}$, suhu plasma $T > 10 \text{ keV}$, lebih besar dari yang diperoleh saat ini yang hanya sebesar 2×10^{10} . Untuk memperoleh nilai kualitas pengungkungan sebesar itu arus plasma harus tinggi 22-25 MA dan medan magnet superkonduktor medan yang sangat kuat sekitar 4.8 T atau 10^5 kuat meda magnet bumi yang besarnya hanya 0.5 G. Magnet

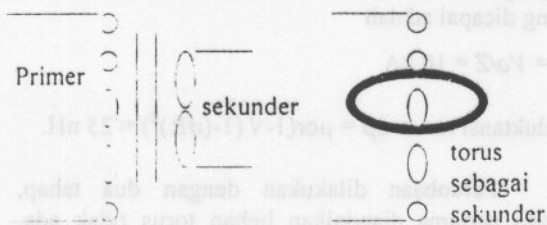
superkonduktor harus diisolasi dari suhu plasma dan tenaga neutron (14 MeV untuk reaksi fusi DT).

Meskipun dapat dikatakan peluang partisipasi grup plasma PPNY-BATAN pada penelitian fusi tidak ada namun tidak ada salahnya dituntut untuk mengikuti perkembangan ITER melalui komunikasi aktif dan juga usaha untuk memperoleh fasilitas eksperimen tokamak mini dari berbagai laboratorium di luarnegeri melalui program hibah, disamping melakukan penelitian awal dan mendasar seperti memahami konsep lucutan plasma pada sistem torus tanpa menambah medan vertikal dan poloidal seperti yang akan ditunjukkan dalam makalah ini.

Dalam makalah ini ditunjukkan prinsip kerja lucutan torus, sistem peralatan dan sistem deteksi arus. Penelitian ini bertujuan untuk mengawali partisipasi aktif grup plasma dalam mengantisipasi perkembangan penelitian fusi dengan pengungkungan sistem magnetik khususnya tokamak setelah tercapainya penelitian terdahulu⁽⁵⁾ dalam menghasilkan fusi DD pada sistem Plasma Fokus.

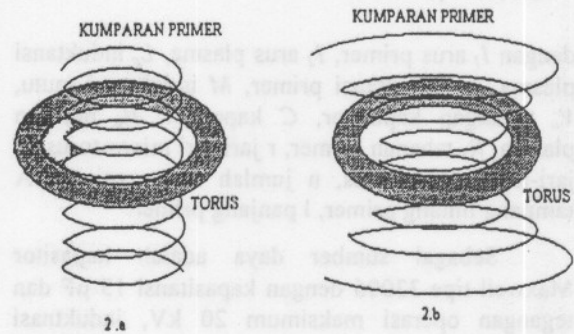
TATA KERJA

Proses lucutan plasma dalam torus ataupun lucutan plasma tokamak pada prinsipnya sama dengan cara kerja transformator biasa, yaitu adanya kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer dihubungkan dengan sumber daya dalam hal ini kapasitor yang dilucutkan melalui sebuah saklar dan sebagai sekundernya adalah torus itu sendiri. Gambar 1 menunjukkan kesetaraan antara transformator dengan lucutan torus.



Gambar 1. Kesetaraan antara transformator dengan lucutan torus.

Untuk sistem lucutan torus sederhana dengan core udara biasa ada dua jenis bentuk kumparan primer seperti yang diperlihatkan gambar 2.

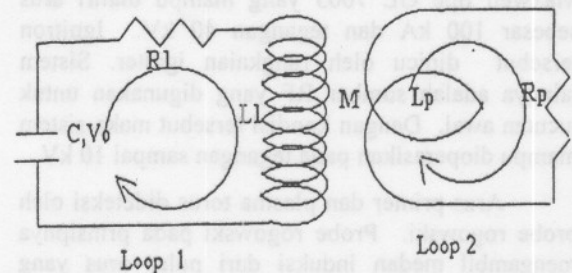


Gambar 2. Bentuk kumparan primer dengan core udara.

Bila saklar S ditutup maka terjadi lucutan arus di primer, dan karena induksi medan ada arus lucut induksi atau disebut pula arus plasma di sekunder dalam hal ini torus.

Dalam makalah ini telah dipilih bentuk primer jenis ke 2b, karena induksi medan yang diperoleh lebih besar.⁽⁶⁾

Karena prinsip kerjanya sama dengan transformator biasa maka rangkaian kesetaraan listriknya dapat digambarkan seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian setara lucutan torus.

Dengan analisis masing-masing untai maka dapatlah disusun persamaan rangkaian sebagai berikut

$$\frac{dI_2}{dt} = (V_0 M + I_2 R_1 L_2 - I_1 R_1 M + M / C) \int I_1 dt / (M^2 - L_1 L_2) \quad (1)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = (I_2 R_1 M + L_1 V_0 - I_1 R_1 L_1 - L_1 / C) \int I_1 dt / (L_1 L_2 - M^2) \quad (2)$$

$$L_1 = (\mu n^2 A / l) \quad (3)$$

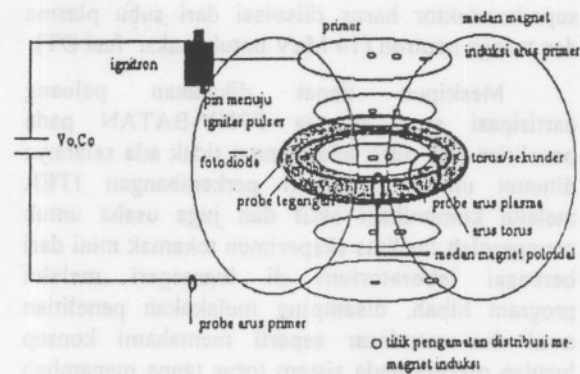
$$L_p = \mu r (1 - \sqrt{1 - (r/R)^2})$$

dengan I_1 arus primer, I_2 arus plasma, L_p induktansi plasma, L_1 induktansi primer, M induktansi mutu, V_0 tegangan kapasitor, C kapasitor, R_p tahanan plasma, R_1 tahanan primer, r jari-jari minor torus, R jari-jari mayor torus, n jumlah lilitan primer, A tampang lintang primer, l panjang primer.

Sebagai sumber daya adalah kapasitor Maxwell tipe 33006 dengan kapasitansi $15 \mu\text{F}$ dan tegangan operasi maksimum 20 kV , induktansi sekitar 25 nH . Kapasitor tersebut dimuati melalui tahanan pembatas arus 100 kohm oleh sumber tegangan tinggi Hipotronics yang mempunyai kemampuan memberikan tegangan maksimum 25 kV , arus maksimum 100 mA . Kumputan primer dari bahan pipa tembaga berdiameter 1 cm , yang dibentuk seperti gambar 2b, dengan ujung-ujung berdiameter 16 cm , diameter tengah 10 cm , panjang 24 cm , jumlah lilitan 11 . Torus atau sekundernya adalah tabung lampu gelas pirex yang mempunyai diameter mayor 17 cm , diameter minor 4 cm . Saluran transmisi dari kapasitor menuju kumputan primer adalah pelat aluminium sejajar dengan tebal 3 mm ukuran $50 \times 30 \text{ cm}^2$, dengan jarak antar pelat sekitar 3 mm , yang diisi isolator yang mempunyai susunan plastik, 3 lapis mylar, plastik. Subagai sistem saklar adalah sebuah ignitron buatan Maxwell tipe GL 7003 yang mampu dialiri arus sebesar 100 kA dan tegangan 40 kV . Ignitron tersebut dipicu oleh rangkaian igniter. Sistem lainnya adalah sumber RF yang digunakan untuk lucutan awal. Dengan kondisi tersebut maka sistem mampu dioperasikan pada tegangan sampai 10 kV .

Arus primer dan plasma torus dideteksi oleh probe rogowski. Probe rogowski pada prinsipnya mengambil medan induksi dari pulsa arus yang diukur kemudian medan induksi diubah menjadi pulsa tegangan. Probe rogowski yang dibuat dari kawat email tembaga berdiameter sekitar 1 mm , diameter kumputan 0.4 cm , jumlah lilitan 80 . Pulsa tegangan dari masing-masing probe ditangkap oleh osiloskop penyimpanan Tektronik seri 7804 dan gambar direkam oleh kamera Tektronik C-59A yang telah dilengkapi dengan film polaroid.

Skema rangkaian percobaan digambarkan seperti gambar 4.



Gambar 4. Skema rangkaian percobaan lucutan torus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari sejumlah parameter fisis sistem torus yang ada maka beberapa karakteristik sistem yang dapat diperkirakan harganya adalah (untuk $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $C = 15 \mu\text{F}$):

$$\text{Induktansi kumputan primer} = (\mu_0 n^2 A / l) = 8.5 \mu\text{H}$$

Induktansi primer diluar kumputan terdiri dari jumlah induktansi diri kapasitor, induktansi saluran transmisi dan induktansi ignitron yang jumlahnya adalah $= (25 + 40 + 5) \text{ nH} = 70 \text{ nH}$, jadi nilainya praktis dapat diabaikan terhadap besar induktansi kumputan primer, sehingga induktansi primer sekitar $8.5 \mu\text{H}$.

Periode osilasi sistem primer (T) dapat diperkirakan sebesar: $T = 2\pi \sqrt{L_1 C} = 70 \text{ udetik}$.

$$\text{Impedansi sistem primer: } Z = \sqrt{L_1 / C} = 0.8 \text{ ohm}$$

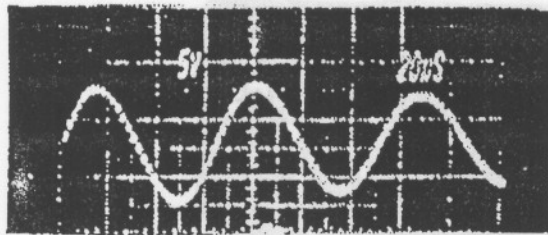
Seandainya sistem dioperasikan pada tegangan 8 kV , maka arus primer maksimum I_1 yang dicapai adalah

$$I_1 = V_0 / Z = 10 \text{ kA}$$

$$\text{Induktansi torus } L_p = \mu_0 r (1 - \sqrt{1 - (r/R)^2}) = 25 \text{ nH}$$

Percobaan dilakukan dengan dua tahap, tahap pertama diandaikan beban torus tidak ada, tahap kedua ada beban torus atau ada plasma dalam torus selama terjadinya lucutan.

Saat sistem tidak mengalami beban, berarti torus tidak menyala maka arus probe rogowski yang dipasang di kumputan primer menunjukkan pulsa seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Pulsa arus yang direkam probe rogowski pada kumparan primer saat tidak ada beban, $V_0 = 9 \text{ kV}$.

Dengan tetapan integrator $RC = 48 \mu\text{detik}$, diameter penampang koil rogowski 4mm, jarak arus primer dengan probe 3.5 cm, maka dengan diperolehnya tegangan probe sebesar 5 V akan diperoleh arus primer tanpa beban sebesar :

$$I_1 = (2\pi RCV/\mu\text{onA}) = 12.75 \text{ kA}$$

Untuk mendapatkan arus primer tanpa beban yang didapat dengan melihat lebar pulsa arus maka I_1 akan diperoleh menurut relasi

$$I_1 = (\pi CV_0(1+f)/T)$$

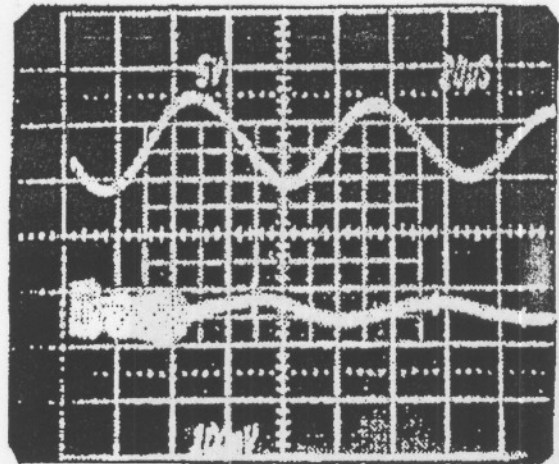
dengan T periode yang didapat dari gambar 5 terlihat 70 μdetik dan $f = 0.9$, maka diperoleh

$$I_1 = 11 \text{ kA}$$

Ada perbedaan harga arus yang diperoleh dari kedua metode perhitungan yang dikarenakan kemungkinan dari toleransi nilai komponen pasif RC pada integrator.

Juga terlihat bahwa periode sistem berdasar perkiraan dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran sama berarti nilai induktansi primer tanpa beban berdasar pengukuran adalah 8.5 μH .

Gambar 6 memperlihatkan pulsa arus primer (gambar atas) dan arus torus (gambar bawah), jadi sistem mengalami beban. Dari gambar 6 terlihat bahwa periode lucutan primer mengalami perubahan menjadi sekitar 65 μdetik .



Gambar 6. Pulsa arus primer dan torus pada $V_0 = 9 \text{ kV}$.

Karena ada perbedaan harga periode saat tanpa dan ada beban maka dapatlah dihitung faktor kopling induktansi primer yaitu

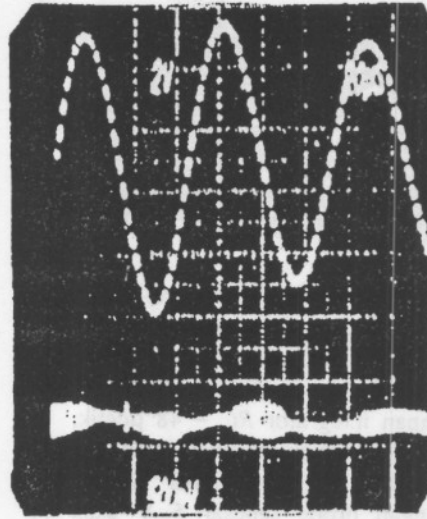
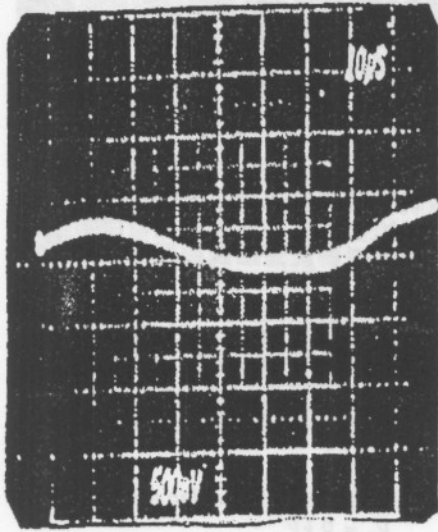
$$k = \sqrt{(1-(T1/T_0)^2)},$$

$T1$ adalah periode primer saat ada beban dan T_0 periode primer saat tidak ada beban torus, sehingga diperoleh

$$k = 0.35$$

Secara visual bila terjadi lucutan arus plasma mama pada lampu torus akan menyala sangat terang dengan waktu nyala sekitar 65 μdetik pula.

Berdasar pengalaman maka bila torus menyala 4 kali, lampu tersebut akan rusak, hal ini disebabkan pada ujung lampu torus tersebut ada sambungan penutup sehingga bila ada arus kuat terjadi pemanasan yang cukup besar sehingga membakar sambungan gelas dan melelehkan gelas tersebut. Pengalaman mudah rusaknya menggunakan gelas juga dialami oleh Androletti dkk⁽⁷⁾ sehingga mereka mengganti dengan bahan logam dengan menyusun torus dalam beberapa penggalan dan dipasangnya isolator diantara penggalan tersebut. Pengalaman juga menunjukkan bahwa penempatan posisi torus



Gambar 7. Arus torus pada tegangan operasi 5 kV (kiri) dan 9 kV (kanan) pada posisi tepat dan kurang tepat.

sangat kritis artinya hanya berubah sedikit saja maka induksi tidak sempurna, sehingga tidak diperolehnya lucutan plasma, demikian pula posisi primer harus sedemikian tegak karena dengan posisi miring sedikit saja juga sangat berpengaruh pada hasil yang dicapai.

Posisi probe rogowski harus pula tegak terhadap penampang torus, sehingga arah medan magnet yang ditimbulkan oleh induksi arus tegak lurus terhadap penampang probe, dan fluks medan yang diterima diposisi tersebut maksimum.

Kekurang tepatnya penempatan torus dan probe arus torus akan berakibat kekurangtepatan hasil yang diperoleh, sehingga tidak jarang terjadi pada tegangan operasi lebih besar namun arus torus yang diperoleh malahan lebih kecil daripada arus yang diperoleh pada tegangan operasi lebih rendah namun penempatannya tepat, seperti yang diperlihatkan pada gambar 7.

Besarnya arus torus I_2 (I_p = arus plasma dalam torus) dapat dihitung bersara relasi

$$I_2 = (2\pi nRC/n\mu_0 A)$$

Pada tegangan 5 kV, maka arus plasma dengan $RC = 480 \mu\text{detik}$, yang terukur adalah

$$I_2 = 4.7 \text{ kA}$$

Tegangan plasma $V_p = L_p \frac{dI_p}{dt}$ yang besarnya sekitar 7.8 V

Tenaga yang diberikan kepada plasma dalam torus adalah $0.5L_p I_p^2$ yang besarnya adalah

$$\text{Tenaga plasma} = 0.31 \text{ J,}$$

dan bila dibandingkan dengan energi yang diberikan kepada sistem keseluruhan sebesar 187.25 J maka efisiensi sistem di atas sangat rendah.

KESIMPULAN

Lucutan plasma dalam torus telah berhasil ditunjukkan dalam satu sistem toroidal sederhana, suatu hasil yang menunjukkan keberhasilan dalam penelitian awal dalam program pengungkapan plasma dengan sistem magnetik. Meskipun telah diperoleh lucutan namun masih perlu dibenahi dalam menempatkan posisi primer dan torus sehingga diperoleh induksi yang seoptimal mungkin, sehingga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi. kekurangefisienan tampak dari nilai k (faktor kopling) yang diperoleh masih rendah, berarti torus tidak memberikan beban berarti pada primer, atau dapat dikatakan induktansi sekunder terlalu kecil. Untuk hal tersebut perlu didukung dari hasil simulasi komputer. Penelitian juga perlu ditingkatkan dengan sistem yang kuat menahan tegangan operasi lebih tinggi ($>18\text{kV}^{(2)}$) disamping penambahan kapasitor agar tenaga yang diberikan cukup besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan teknis kepada Sdr. -2 Sunardi, Giri Slamet, Achmad Zaenuri, Sudaryanto, Ngatinu dan Badi Wiyono (*Kel.Komputer*), dan Waluyo (*Bengkel Induk*). Penelitian ini dibiayai oleh Proyek Penguasaan dan Pengembangan Proses pembuatan Bahan Unggul PPNY-BATAN, tahun 1995/1996.

DAFTAR PUSTAKA

1. LIEK WILARJO, Kompas, 12 Desember 1991
2. UNU, *Work in Progress*, vol. 14, No. 2, December 1993.
3. CONNR.W, *Scientific American*, April 1994, pp. 75-80.
4. SAKANAKA P.H., in Procs. II Tropical Coll. on Applied Physics; Laser and Plasma Technology, World. Scie. Publ. Co, 1986.
5. WIDDI USADA DKK., Pemetaan Neutron Yield Plasma Fokus, dalam Pros. Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PPNY-BATAN, 1992.
6. ONG CHIA XIAN, *Experimental Studies of A Toroidal Plasma*, M.Sc. Thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia 1987.
7. ANDROLETTI J, ET AL, "High Intensity Discharges in Deuterium in a Metal wall Torus", Contrll. Fusion Devices (Procs. of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958).

TANYA JAWAB

Seno

- Saya sangat interes terhadap ignitron pada lucutan plasma bentuk torus. Mohon dijelsakan lebih rinci sistem kerjanya, dan bagaimana

karakteristik (kemampuan) dari saklar tersebut mengingat lucutan plasma bentuk torus tersebut perlu tegangan tinggi dan arus kuat. Mengingat sekarang ada sistem semikonduktor yang ada dipasaran yaitu 16BT hanya mampu dilewati arus sekitar 300 A tegangan 12 kV.

Widdi Usada

- Pada dasarnya ignitron adalah saklar listrik. Keistimewaannya adalah bisa dilalui arus maksimum 100 kA. Prinsip kerjanya adalah sbb.: bila ignitron dihubungkan dengan igniter yang mempunyai tegangan 800 V, maka pulsa arus igniter akan menguapkan cairan merkuri (Hg) yang ada dalam tabung ignitron. Uap berjalan ke atas mengenai anode yang sudah terhubung dengan kapasitor, maka muatan dari kapasitor akan terlucut melalui ignitron yang sudah terhubung pendek karena adanya uap merkuri yang bersifat konduktor, menuju sistem primer.

Tjipto Sujitno

- Suhu plasma adalah dalam orde ribuan K. bagaimana cara mengukurnya dan apakah tabungnya tidak pecah.

Widdi Usada

- Cara mengukur suhu plasma dalam torus ada dua metode yaitu dengan probe Langmuir dan metode holografi. Namun kedua metode tersebut belum dilakukan. Ya, dalam eksperimen kami, 4 kali percobaan tabung akan pecah.

Pramudita Anggraita

- Mengapa arus primer berbentuk sinus?
- Berapa lama osilasi sinus berlangsung?

Widdi Usada

- Karena yang dominan dalam sistem lucutan adalah LC
- Sekitar 3 periode ($3 \times 65 \mu\text{detik}$) atau sama dengan 195 μdetik .