

STUDI KOMPARASI SUMBER ION RF DAN SUMBER ION PENNING UNTUK GENERATOR NEUTRON KOMPAK

Djoko Slamet Pudjorahardjo

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Babarsari No.21, Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281
e-mail: s_pujorharjo@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI KOMPARASI SUMBER ION RF DAN SUMBER ION PENNING UNTUK GENERATOR NEUTRON KOMPAK. Sumber ion merupakan komponen utama generator neutron kompak untuk menghasilkan ion-ion deutron yang akan ditembakkan pada target deuterium atau tritium sehingga terjadi reaksi fusi D-D atau D-T yang menghasilkan neutron cepat. Diantara tipe-tipe sumber ion yang biasanya digunakan pada generator neutron kompak adalah sumber ion tipe RF dan tipe Penning. Telah dilakukan kajian komparasi terhadap sumber ion tipe RF dan tipe Penning untuk generator neutron kompak. Dari hasil kajian disimpulkan bahwa sumber ion RF mempunyai konsumsi daya yang lebih tinggi dibanding sumber ion Penning yaitu sekitar 2 kalinya. Efisiensi sumber ion RF lebih tinggi karena ion-ion yang dihasilkan sebagian besar adalah ion atomik (>80%), sedangkan sumber ion Penning sebagian besar adalah ion molekuler dan hanya sebagian kecil ion atomik (<10%). Oleh karena itu sumber ion RF dapat memberikan neutron yield yang lebih tinggi dari pada sumber ion Penning.

Kata Kunci : sumber ion RF, sumber ion Penning, generator neutron kompak

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY OF RF ION SOURCE AND PENNING ION SOURCE FOR COMPACT NEUTRON GENERATOR. Ion source is a main part of compact neutron generator to product deutron ions for bombarding deuterium or tritium target and subsequently induce D-D or D-T fusion reactions and yields fast neutrons. Among ion source types usually used in compact neutron generator are RF type ion source and Penning type ion source. Comparative study of RF ion source and Penning ion source for compact neutron generator has been done. From the study it is concluded that RF ion source has higher power consumption than Penning ion source (~ 2 times). The efficiency of RF ion source is higher because the ions produced by RF ion source are mostly atomic ions (>80%) whereas the ions produced by Penning ion source are mostly molecular ions and only little amount (<10%) are atomic ions. Therefore RF ion source has higher neutron yield than Penning ion source.

Keywords : RF ion source, Penning ion source, compact neutron generator

PENDAHULUAN

Generator neutron kompak telah menjadi sumber neutron alternatif yang sangat menarik untuk menggantikan sumber neutron yang berasal dari reaktor nuklir dan radioisotop, terutama untuk aplikasi neutron di lapangan seperti aplikasi neutron di bidang medis, analisis berbagai macam material mulai dari batubara, semen hingga deteksi bahan peledak seperti ranjau darat, industri pengeboran minyak, dan lain-lain [1].

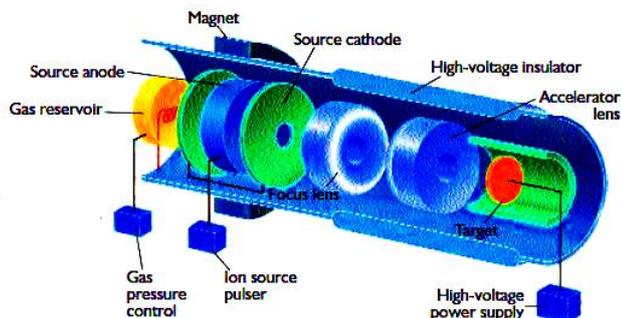
Beberapa hal yang harus dipertimbangkan dari aplikasi generator neutron di lapangan adalah generator neutron harus mudah untuk dipindah-pindahkan sehingga ukurannya harus portabel, neutron yield yang tinggi dan umur operasional yang panjang. Ukuran portabel dari generator neutron kompak dapat terpenuhi karena konstruksi bagian-bagian generator neutron kompak sedemikian rupa di dalam tabung dengan ukuran kecil sehingga sering disebut sebagai tabung neutron atau sealed tube. Produksi neutron per detik (neutron yields) dari tabung neutron ditentukan oleh tegangan pemercepat

dan intensitas sumber ion. Neutron yields 10⁸ hingga 10¹¹ ns⁻¹ dapat dihasilkan oleh tabung neutron berbasis reaksi fusi D-T [2].

Generator neutron kompak mempunyai beberapa keunggulan dibanding dengan sumber neutron dari reaktor nuklir dan radioisotop, yaitu dapat dioperasikan dalam mode kontinyu dan pulsa, tidak ada kekritisan keselamatan (safety criticality), tidak ada bahaya radiasi apabila dalam keadaan tidak dioperasikan (switched off), mudah untuk dipindah-pindahkan (transportasi mudah). Ukuran generator neutron kompak dapat mencapai panjang ~ 50 cm dan diameter ~ 10 cm [3].

Komponen utama generator neutron kompak terdiri dari sumber ion, sistem pemercepat dan sistem target yang dikonstruksi secara kompak seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [4]. Komponen-komponen utama generator neutron kompak berada dalam suatu tabung sehingga disebut sebagai tabung neutron. Unjuk kerja generator neutron kompak dapat dilihat dari besarnya neutron yield, yaitu jumlah neutron yang

dihasilkan per detik. Parameter yang mempengaruhi neutron yield antara lain adalah intensitas sumber ion, yaitu arus ion deuteron yang dihasilkan oleh sumber ion dan menumbuk target.



Gambar 1. Konstruksi generator neutron kompak [4].

Ion-ion deuteron dihasilkan oleh sumber ion. Tipe sumber ion yang digunakan mempengaruhi ion-ion deuteron yang dihasilkannya. Beberapa tipe sumber ion yang biasa digunakan pada generator neutron adalah sumber ion tipe katoda dingin atau Penning, tipe katoda panas, tipe magnetron dan tipe RF. Di antara jenis-jenis sumber ion tersebut, sumber ion tipe Penning selama ini paling umum digunakan pada generator neutron kompak karena disainnya yang sederhana dan tahan lama (durable) [4].

Pada awal tahun 2000-an Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), California, USA telah mengembangkan generator neutron kompak untuk berbagai aplikasi menggunakan sumber ion tipe RF dan ternyata dapat menghasilkan neutron yield yang cukup tinggi yaitu 109 - 1010 n/s dari reaksi D-D[5]. Hal ini menarik untuk dilakukan studi komparasi untuk membandingkan beberapa parameter keluaran generator neutron kompak yang menggunakan sumber ion tipe RF hasil pengembangan di LBNL dengan generator neutron kompak yang selama ini menggunakan sumber ion tipe Penning. Hasil studi komparasi tersebut dibahas dalam makalah ini.

METODOLOGI

Studi komparasi ini dilakukan dengan mempelajari bahan-bahan pustaka terkait dengan generator neutron kompak, sumber ion RF dan sumber ion Penning sebagai salah satu komponen utama generator neutron kompak. Dari sisi teknologi sumber ion RF sangat berbeda dengan sumber ion Penning, terutama cara pemberian energi untuk pembentukan plasma di dalam ruang ionisasi sumber ion. Oleh karena itu studi komparasi ini meliputi beberapa hal terkait dengan:

1. Prinsip dasar sumber ion RF dan sumber ion Penning
2. Pembentukan ion-ion dalam sumber ion RF dan sumber ion Penning
3. Parameter-parameter operasi sumber ion RF dan sumber ion Penning dalam generator neutron kompak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagaimana telah diketahui bahwa generator neutron kompak merupakan perangkat akselerator ion penghasil neutron dengan ukuran yang kecil (portabel) sehingga sangat cocok untuk aplikasi neutron di lapangan. Neutron yang dihasilkan oleh generator neutron adalah hasil dari reaksi fusi antara deuteron dengan deuteron (reaksi D-D) atau antara deuteron dengan triton (reaksi D-T) yang dituliskan dalam persamaan reaksi sebagai berikut:

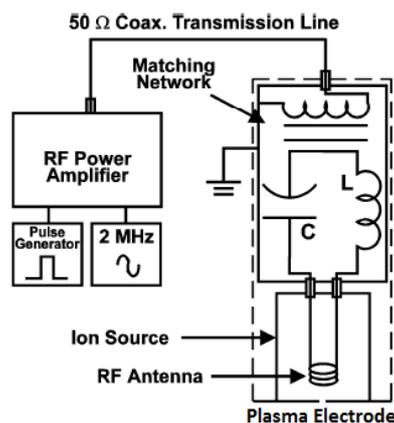


Energi neutron yang dihasilkan oleh masing-masing reaksi fusi tersebut adalah 2,45 MeV dan 14,1 MeV. Reaksi fusi tersebut berlangsung pada sistem target yang ditembak dengan ion-ion deuteron yang dihasilkan oleh sumber ion.

Pembentukan ion-ion deuteron dalam sumber ion diawali dengan terbentuknya plasma dari gas deuterium dalam sumber ion. Sebagaimana diketahui bahwa plasma adalah gas yang terionisasi, terdiri dari ion dan elektron dalam kesetimbangan quasi-netral sehingga muatan listrik plasma secara keseluruhan hampir nol (netral). Plasma merupakan konduktor listrik yang sangat baik karena adanya partikel-partikel bermuatan yang bebas bergerak di dalam plasma. Beberapa proses pembentukan plasma yang umum digunakan adalah lucutan arus searah (DC), medan radio frequency (RF) dan gelombang mikro (microwave)[6].

Sumber Ion RF

Skema susunan sumber ion RF ditampilkan pada Gambar 2 [7].



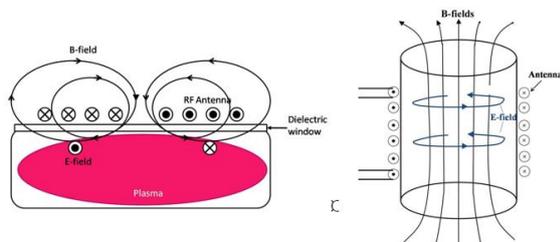
Gambar 2. Skema susunan sumber ion RF[7].

Pada prinsipnya sumber ion RF terdiri dari sumber daya RF yang mensuplai medan RF, rangkaian penyesuai impedansi (matching network), antenna RF untuk menghantarkan medan RF ke dalam plasma, tabung atau bejana plasma sebagai tempat terbentuknya plasma (ionisasi), elektroda plasma sebagai celah keluarnya ion-ion dari tabung plasma.

Sumber ion RF memerlukan generator RF sebagai sumber dayanya. Generator RF biasanya

beroperasi pada frekuensi 13,56 MHz. Impedansi keluaran generator RF menyesuaikan dengan impedansi transmission line yaitu 50 ohm. Matching unit diperlukan untuk menyesuaikan terhadap impedansi antenna RF (biasanya 0,5 – 2 ohm) agar transfer daya RF maksimal serta untuk proteksi peralatan [7].

Pembentukan plasma dalam sumber ion RF menggunakan medan RF yaitu dengan mengalirkan arus RF melalui antenna RF (kopling RF) ke dalam bejana plasma berisi gas deuterium yang akan diionisasi. Arus RF akan membangkitkan medan magnet sinusoidal yang pada akhirnya membangkitkan medan listrik sinusoidal. Medan listrik ini mempercepat gerak elektron bebas di dalam gas netral hingga energinya cukup untuk mengionisasi gas deuterium menjadi plasma [6]. Kopling RF melalui antenna RF dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu kopling secara kapasitif dan secara induktif. Pada kopling secara kapasitif, suatu tegangan tinggi yang beresilasi dengan frekuensi RF dipasang antara antenna RF dengan elektrode plasma. Plasma yang terjadi biasanya dengan kerapatan rendah yang ditandai dengan cahaya yang suram (dim) keunguan (untuk gas hidrogen). Sedangkan pada kopling secara induktif, arus RF pada antenna RF divariasikan sehingga menghasilkan medan magnet yang bervariasi dalam ruang plasma, selanjutnya menginduksi medan listrik yang mengakselerasi elektron dalam ruang plasma dan memulai pembentukan plasma. Plasma yang terjadi dengan kerapatan tinggi yang ditandai dengan cahaya terang kemerahan (untuk gas hidrogen). Kopling plasma secara induktif banyak digunakan karena dapat menghasilkan rapat arus ion yang tinggi dan fraksi ion atomik yang lebih tinggi[8].



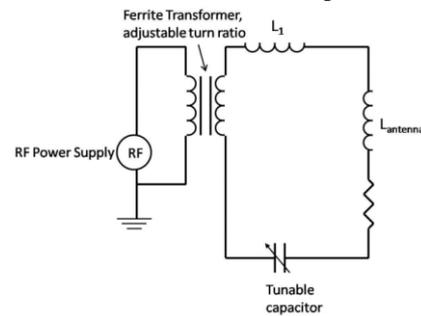
Gambar 3. Antena RF berbentuk spiral datar (kiri) dan spiral silindris (kanan) untuk kopling RF secara induktif pada sumber ion tipe RF[8].

Antena RF untuk kopling RF secara induktif dapat berbentuk spiral datar atau spiral silindris seperti ditampilkan pada Gambar 3[8].

Antena RF dapat dipasang secara internal (di dalam ruang plasma) atau secara eksternal (di luar ruang plasma). Arus RF yang dialirkan ke antenna RF berasal dari generator RF. Antara generator RF dan antenna RF dipasang rangkaian penyesuai impedansi (matching network) untuk menyesuaikan impedansi antenna RF dan plasma dengan impedansi generator RF yang besarnya 50 ohm. Dengan demikian daya RF yang terserap dalam plasma menjadi maksimum. Pada Gambar 4 ditampilkan rangkaian penyesuai impedansi[8].

Rangkaian tersebut menggunakan transformer ferrit dengan turn ratio yang variable. Dibagian sekunder

terdapat rangkaian resonansi serial termasuk antenna RF. Impedansi keluaran sumber daya RF yang besarnya 50 ohm disesuaikan dengan impedansi antenna dengan cara mengatur turn ratio transformer dan kapasitor variable.



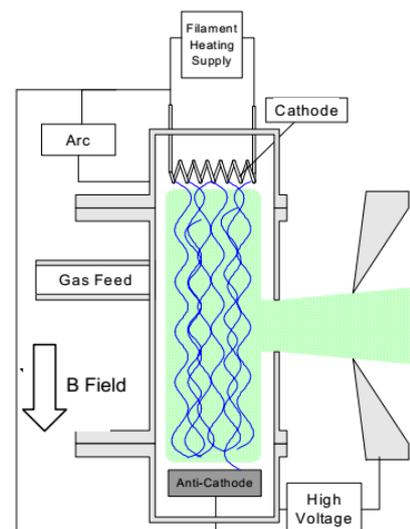
Gambar 4. Rangkaian penyesuai impedansi (matching network)[7].

Sumber ion RF untuk generator neutron kompak telah dikembangkan di Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), California, USA. Sumber ion RF untuk generator neutron kompak tersebut berbeda dengan yang sudah diproduksi secara komersial. Karakteristik sumber ion RF tersebut adalah umur yang panjang, efisiensi gas tinggi, kerapatan plasma tinggi dan sebagian besar ion adalah ion atomik. Dengan demikian neutron yield menjadi lebih tinggi dengan ukuran beam spot yang kecil tanpa pemanasan lebih (over heating) pada target[9].

Sumber Ion Penning

Sumber ion Penning sudah lama digunakan untuk generator neutron melalui reaksi fusi D-D atau D-T karena konsumsi dayanya yang rendah, pengoperasiannya mudah dan dapat dibuat kompak. Sumber ion tipe Penning banyak digunakan pada generator neutron kompak yang sudah komersial diproduksi oleh beberapa pabrik generator neutron kompak (Thermo Electron, Sodern, Schlumberger, dll) dengan neutron yield sekitar $10^8 - 10^{11}$ n/s hasil dari reaksi fusi DT[10].

Skema susunan sumber ion Penning seperti ditampilkan pada Gambar 5[11].



Gambar 5. Skema susunan sumber ion Penning[11].

Pada prinsipnya sumber ion Penning terdiri dari anoda berbentuk tabung yang pada kedua ujungnya masing-masing terdapat katoda berbentuk filamen dan anti katoda berbentuk plat. Anoda biasanya dipasang pada tegangan bias 1 – 2 kV. Katoda filamen menghasilkan elektron bebas untuk menumbuk atom atau molekul gas di dalam tabung anoda sehingga terjadi ionisasi dan terbentuk plasma. Tekanan gas di dalam tabung diatur antara 10⁻³ mbar sampai 1 mbar sehingga jarak bebas rerata elektron dalam orde dimensi tabung sumber ion. Bila tekanan gas terlalu tinggi maka elektron akan kehilangan energinya karena tumbukan sehingga tidak dapat mencapai tingkat energi yang diperlukan untuk ionisasi gas[11].

Suatu medan magnet sejajar dengan sumbu tabung sumber ion dengan intensitas minimal 0,1 T untuk membuat agar elektron tidak menumbuk anoda dan anti katoda melainkan bergerak osilasi sehingga tumbukan dengan gas makin banyak dan ionisasi bertambah banyak. Ion-ion dalam plasma dapat berdifusi ke dinding tabung anoda, sehingga memungkinkan untuk menempatkan suatu celah ekstraksi sebagai jalan keluar ion-ion dari sumber ion dan membentuk berkas ion (ekstraksi secara transversal). Alternatif lain letak celah ekstraksi adalah di anti katoda sehingga ion-ion keluar dari sumber ion searah dengan sumbu tabung sumber ion (ekstraksi secara aksial). Keseluruhan sumber ion berada pada potensial tinggi positif, dengan celah ekstraksi menghadap suatu elektroda penarik yang pada potensial ground. Medan listrik antara celah ekstraksi dan elektroda penarik memberikan efek percepatan kepada ion-ion yang keluar dari sumber ion dan membentuk berkas ion[11].

Komparasi Sumber Ion RF dan Sumber Ion Penning

Sumber ion Penning yang banyak digunakan pada generator neutron kompak komersial meskipun bentuknya kompak dan konsumsi dayanya rendah, tetapi efisiensinya rendah karena ion-ion yang dihasilkan oleh sumber ion tipe Penning sebagian besar adalah jenis ion molekular dan hanya sedikit jenis ion atomik. Untuk meningkatkan efisiensi dapat dilakukan dengan menaikkan arus ion dan energi berkas ion. Tetapi hal ini akan berakibat pada peningkatan daya yang signifikan pada permukaan target. Generator neutron kompak komersial dengan sumber ion tipe Penning dan daya sekitar 6 W dapat menghasilkan rapat daya 700 W/cm² dengan beam spot sebesar 1 mm. Hal ini terlalu besar untuk didinginkan secara efektif menggunakan udara. Akibatnya ion-ion deuterium/tritium yang tertanam pada target akan terlempar dari permukaan target dan mengakibatkan penurunan neutron yield[12].

Sumber ion tipe RF dapat menghasilkan plasma dengan kerapatan tinggi dan arus ion yang dihasilkan sebagian besar berjenis ion atomik. Dengan demikian efisiensi menjadi besar sehingga diperoleh neutron yield yang lebih tinggi dengan ukuran beam spot yang kecil tanpa pemanasan yang berlebih pada target. Perbandingan sumber ion RF dengan sumber ion Penning untuk generator neutron kompak ditampilkan pada Tabel 1[12].

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa sumber ion RF menghasilkan fraksi ion atomik yang lebih besar dibandingkan dengan sumber ion Penning. Sumber ion RF juga menghasilkan daya pada target yang lebih kecil sehingga dapat mengurangi terjadinya pengikisan ion-ion yang tertanam (implanted) pada target dan akibatnya neutron yield menjadi lebih besar[12].

Tabel 1. Perbandingan sumber ion RF dengan sumber ion Penning untuk generator neutron kompak[12].

Parameter Operasi	Sumber ion RF	Sumber ion Penning
Konsumsi daya	100 - 125 W	50 W
Arus berkas ion	20 - 50 μ A	60 μ A
Energi berkas ion	80 kV	95 kV
Diameter beam spot	1 mm	2 - 3 mm
Fraksi ion atomik	> 80%	< 10%
Neutron yield	108 n/s	107 n/s
Daya pada target	1,6 - 4 W	5,7 W

Sumber ion RF dikembangkan di LBNL untuk generator neutron kompak yang juga dikembangkan disana. Berbeda dengan generator neutron kompak yang telah diproduksi oleh beberapa produsen generator neutron kompak di dunia, maka generator neutron kompak yang dikembangkan di LBNL adalah berbasis reaksi fusi D-D. Dengan menggunakan sumber ion RF maka neutron yield dapat ditingkatkan meskipun tampang lintang reaksi D-D lebih kecil dari pada tampang lintang reaksi D-T[9].

Ada 2 jenis generator neutron kompak yang dikembangkan LBNL yaitu generator neutron kompak aksial dan koaksial[9]:

Generator neutron kompak jenis aksial menggunakan sumber ion RF dengan antena RF diluar sumber ion (eksternal), tabung plasma dari quartz, elektrode plasma dari molibdenum. Target deuterium berada didalam tabung vakum aluminium yang terisolasi dari potensial ground. Neutron yield rata-rata yang dihasilkan 108 n/s tergantung pada arus berkas ion.

Generator neutron kompak jenis koaksial menggunakan sumber ion RF dengan antena RF didalam sumber ion (internal). Konstruksi sumber ion berada di tengah generator neutron dengan celah ekstraksi sumber ion disekeliling tabung plasma. Target deuterium berada disekeliling luar sumber ion. Neutron yield rata-rata yang dihasilkan 1011 n/s tergantung pada arus berkas ion.

KESIMPULAN

Dari hasil studi komparasi sumber ion RF dan sumber ion Penning untuk generator neutron kompak dapat disimpulkan bahwa:

1. Sumber ion RF mempunyai konsumsi daya yang lebih besar dari pada sumber ion Penning.
2. Sumber ion RF dibanding sumber ion Penning mempunyai efisiensi yang lebih tinggi karena ion-ion yang dihasilkan sebagian besar adalah ion atomik,

sedangkan sumber ion Penning sebagian besar adalah ion molekuler.

3. Untuk generator neutron kompak maka sumber ion RF dapat memberikan neutron yield yang lebih tinggi dari pada sumber ion Penning.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. REIJONEN, Compact Neutron Generators For Medical, Home Land Security, And Planetary Exploration, Proceeding of Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 2005.
- [2] G. Mank, G. Bauer, and F. Mulhauser, Accelerators for Neutron Generation and Its Applications, IAEA Coordinated Research Projects on Neutron Research,
- [3] B.K. Das, A. Shyam, Development of Compact Size Deuteron Accelerator, Energetic and Electromagnetic Division, Bhabha Atomic Research Center, Bhat, Gandhinagar-382428, India.
- [4] D. L. Chichester and J. D. Simpson, 2004, Compact Accelerator Neutron Generators, The Industrial Physicist 9 (6): 22–25, December 2003/January 2004.
- [5] K.N. LEUNG, J. REIJONEN, F. GICQUEL, S. HAHTO, T.P. LOU, Compact Neutron Generator Development and Applications, Reseach Report, U.S. Department of Energy, Contract No. DE-AC03-76SF00098, LBNL Berkeley California, USA, 1998.
- [6] S. Hahto, Development of Negative Ion Sources for Accelerator, Fusion and Semiconductor Manufacturing Applications, Ph.D Dissertation at University of Jyvaskyla, Finland, 2003.
- [7] L. T. Perkins, C. M. Celata, K. N. Leung, D. S. Pickard, R. Vilaithong, and M. D. Williams, A Compact RF Driven Pulsed Ion Source For Intense Neutron Generator, Reseach Report, U.S. Department of Energy, Contract No. DE-AC03-76SF00098, LBNL Berkeley California, USA, 1998.
- [8] Y. WU, Development of a Compact Neutron Generator to be Used For Associated Particle Imaging Utilizing a RF-Driven Ion Source, Dissertation, University of California, Berkeley, 2009.
- [9] T. P. Lou, Compact D-D / D-T Neutron Generators and Their Applications, PhD Dissertation, University of California, Berkeley, USA, 2003.
- [10]-----, Compact Neutron Generators, Neutron Generators for Analytical Purposes, IAEA Radiation

Technology Report Series No.1, IAEA, Vienna: p.57, 2012.

- [11]R. SCRIEVENS, Electron and Ion Sources for Particle Accelerators, Lecture given at CERN Accelerator School, Zakopane, Poland, 2006.
- [12]D.S. PUDJORAHARDJO, dkk, Kajian Aplikasi Generator Neutron Kompak Untuk Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Seminar Nasional INSINAS 2014, Bandung, 1 – 2 Oktober 2014.

TANYA JAWAB

Sunardi

1. Apa kelebihan dan kekurangan sumber ion RF dengan penning
2. Untuk GN, manakah yang lebih baik ditinjau dari konstruksi, operasi dan life time

Djoko SP

1. *Kelebihan dan kekurangan:*
 - a. *Kelebihan sumber ion RF terhadap penning :*
 - Efisiensi ionisasi lebih besar
 - Menghasilkan ion-ion atomik lebih banyak
 - Life time lebih panjang
 - b. *Kekurangan :*
 - Konsumsi daya lebih besar
 - Konstruksi lebih rumit (memerlukan generator RF)
2. *Generator Neutron ditinjau dari :*
 - a. *Konstruksi, penning lebih sederhana dibanding RF tetapi efisiensinya rendah*
 - b. *Operasi, RF lebih stabil*
 - c. *Life time, RF lebih lama*

Darsono

Secara komparatif, teknologi dan ekonomi, sumber ion mana yang paling baik

Djoko SP

1. *Secara teknologi sumber ion RF lebih baik dibandingkan sumber ion penning karena dengan teknologi RF meskipun lebih rumit tetapi efisiensinya lebih tinggi, ion atomik lebih banyak asehingga neutron yield dari generator neutron jadi lebih baik*
2. *Secara ekonomi karena efisiensi lebih tinggi maka sumber ion RF menjadi lebih hemat gas (deuterium/hidrogen) sehingga lebih ekonomis dibandingkan sumber ion penning*

