

ANALISIS KEMAMPUAN IONISASI GAS H₂, D₂, DAN He PADA SUMBER ION MULTICUSP

Kasmudin

PRPN-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd. 71 Lt. 2 Serpong, Kota Tangsel

ABSTRAK

ANALISIS KEMAMPUAN IONISASI GAS H₂, D₂, DAN He PADA SUMBER ION MULTICUSP. Untuk menilai kemampuan sumber ion multicusp, telah dilakukan analisis terhadap unjuk kerja katoda dalam memasok elektron, unjuk kerja anoda dalam menarik elektron dari filamen katoda, besar energi kinetik elektron-elektron dalam tumbukan dengan partikel-partikel gas untuk mengionisasinya, unjuk kerja medan magnet dalam memutar-mutar elektron dalam ruang ionisasi, serta laju pembentukan ion yang dihasilkan. Konstruksi dari sumber ion ini terdiri dari sistem pemasok gas, sistem pembentuk ion, sistem pembentuk berkas ion, sistem vakum, dan sumber-sumber daya kelistrikan. Hasil analisis dan perhitungan menunjukkan bahwa sumber ion mampu menghasilkan proton atau deuteron dengan kerapatan $3,6 \times 10^{16}$ ion/(cm³.s) dan menghasilkan alpha dengan kerapatan $1,35 \times 10^{16}$ alpha/(cm³.s).

Kata kunci: analisis, sumber ion multicusp, ionisasi gas

ABSTRACT

ANALYSIS OF H₂, D₂, AND He IONISATION PERFORMANCE IN THE MULTICUSP ION SOURCE. To evaluate the performance of the multicusp ion source, an analysis has been carried out which included the study of the performance of the cathode in supplying electrons, the performance of the anode in pulling the electrons from the cathode filament, the magnitude of the electrons kinetic energy during their collisions with gas particles to ionize the particles, the performance of the magnetic field to confine the electrons inside the ionizing chamber, as well as the rate at which ions are produced. The ion-source consists of a gas inlet system, an ion generating system, an ion beam focusing system, a vacuum system, and power supplies. The results showed that the ion source is capable of generating proton or deuteron at a density of 3.6×10^{16} ions/(cm³.s) and alpha particles at a density of 1.35×10^{16} alpha/(cm³.s).

Keywords: analysis, multicusp ion source, gas ionisation

1. PENDAHULUAN

Sebagai bagian dari pengembangan *accelerator driven system* (ADS) skala kecil untuk studi transmudasi limbah radioaktif, telah didesain dan dikembangkan perancangan prototip sumber ion jenis *multicusp* yang bisa menghasilkan ion-ion positif seperti proton, deuteron, atau alpha sesuai dengan sumber gas yang digunakan atau dipasang ke dalam *plasma chamber* dari sumber ion tersebut. Sumber ion akan menghasilkan proton jika ke dalam *plasma chamber* dipasang gas hidrogen. Sumber ion akan

menghasilkan deuteron jika ke dalam *plasma chamber* dipasang gas deuterium. Dan sumber ion akan menghasilkan alpha jika ke dalam *plasma chamber* dipasang gas helium. Gas apa yang akan dipasang ke dalam *plasma chamber* dapat disesuaikan dengan keadaan dan kebutuhan di lapangan.

Pada pengembangan ADS ini, ion-ion positif yang dihasilkan sumber ion akan dipercepat hingga ratusan keV dan diarahkan atau ditembakkan kepada target tertentu untuk menghasilkan neutron. Dalam hal ini target atau sasaran disesuaikan dengan ion-ion positif yang

ditembakkan agar diperoleh yield neutron yang optimum. Jika targetnya adalah gas tritium, maka ion-ion positif yang ditembakkan adalah deuteron dan gas yang dipasok ke dalam *plasma chamber* adalah gas deuterium sehingga terjadi reaksi $H^3(d,n)He^4$. Jika targetnya adalah berilium, maka ion-ion positif yang ditembakkan adalah alpha dan gas yang dipasok ke dalam plasma chamber adalah gas helium sehingga terjadi reaksi $Be^9(\alpha,n)C^{12}$. Selanjutnya neutron yang dihasilkan dari reaksi ini diinjeksikan ke suatu reaktor subkritik mini untuk menghasilkan reaksi fisi berantai subkritik.

Pemilihan sumber ion jenis *multicusp* didasarkan pada pengkajian yang telah dilakukan terhadap akselerator dalam ADS skala normal yang umumnya menggunakan sumber ion jenis *multicusp* [1]. Pada sumber ion *multicusp*, plasma yang dibangkitkan oleh magnet-magnet permanen dihasilkan dengan volume besar, uniform dan stabil dengan kerapatan melebihi 10^{12} ion/cm³ [2]. Hasil-hasil eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan yang besar dalam kerapatan ion pada sumber ion jenis ini disebabkan oleh pengungkungan elektron ionisasi utama oleh medan dipol magnet [3]. Akan tetapi kandungan ionnya agak kurang, dalam hal ini karena plasma dapat hilang ke arah *cusps* (jaring-jaring) alur dan ke daerah di antara *cusps*.

Sumber ion *multicusp* dapat menghasilkan ion-ion positif karena partikel-partikel gas di dalam ruang ionisasi bertumbukan dengan elektron-elektron sehingga terjadi ionisasi. Ionisasi tumbukan elektron dapat menghasilkan kerapatan ionisasi yang besar walaupun energi elektron dalam tumbukan hanya mampu melepaskan elektron-elektron yang ikatannya lemah seperti terdapat pada atom-atom gas dengan nomor atom kecil. Komponen utama sumber ion *multicusp* terdiri dari katoda sebagai pemancar elektron, anoda sebagai penutup ruang ionisasi yang sering disebut *plasma chamber*, beberapa kutub magnet yang disusun untuk membentuk jaring-jaring (*cusp*) medan magnet di dalam ruang ionisasi, sebuah elektroda ekstraksi untuk mengekstraksi ion-ion dari

ruang ionisasi, elektroda *puller* untuk menarik keluar ion-ion positif dari ruang ionisasi, dan elektroda *ground*.

Karena adanya tegangan positif antara anoda dan katoda, maka elektron bergerak dari katoda ke anoda dan mengionisasi gas yang ada di dalam *chamber*. Konfigurasi jaring-jaring medan magnet akan memantulkan elektron ketika bergerak mendekati anoda dan banyaknya jaring-jaring medan magnet akan menentukan banyaknya pantulan. Pemantulan ini akan meningkatkan probabilitas terjadinya ionisasi partikel-partikel gas. Karena jaring-jaring medan magnet ini pulalah yang menyebabkan elektron-elektron terkungkung di dalam plasma dan ini dapat dimanfaatkan sebagai kompensasi berkurangnya efisiensi ionisasi gas pada tekanan rendah.

Tegangan negatif pada elektroda ekstraksi sedikit lebih lemah dibandingkan dengan tegangan anoda, sehingga ion-ion positif mengalir dari ruang ionisasi dan adanya tegangan tinggi positif ekstraktor (yang dihubungkan ke tanah) menyebabkan ion-ion tertarik keluar atau terekstrak ke potensial *ground* dan memenuhi sebagian elektroda *ground*. Antara elektroda ekstraksi dan elektroda *ground* terdapat elektroda penarik yang disebut elektroda *puller* dengan tegangan negatif yang ditujukan untuk membentuk sistem lensa bersama-sama dengan elektroda ekstraksi dan elektroda *ground*. Tegangan negatif elektroda *puller* juga membatasi elektron-elektron tertarik oleh potensial positif ruang ionisasi sehingga tidak menumbuk *chamber*. Posisi relatif elektroda *puller* terhadap elektroda ekstraksi mempunyai pengaruh besar terhadap pancaran *beam* dan dengan menggeser-geser posisi relatif tersebut bisa didapatkan posisi optimum yang menghasilkan pancaran *beam* dengan intensitas maksimum dan emitansi minimum.

Pada makalah ini akan disajikan perhitungan dan analisis kemampuan ionisasi sumber ion *multicusp* hasil rekayasa dalam mengionisasi gas hidrogen menjadi proton, gas deuterium menjadi deuteron, dan gas helium menjadi

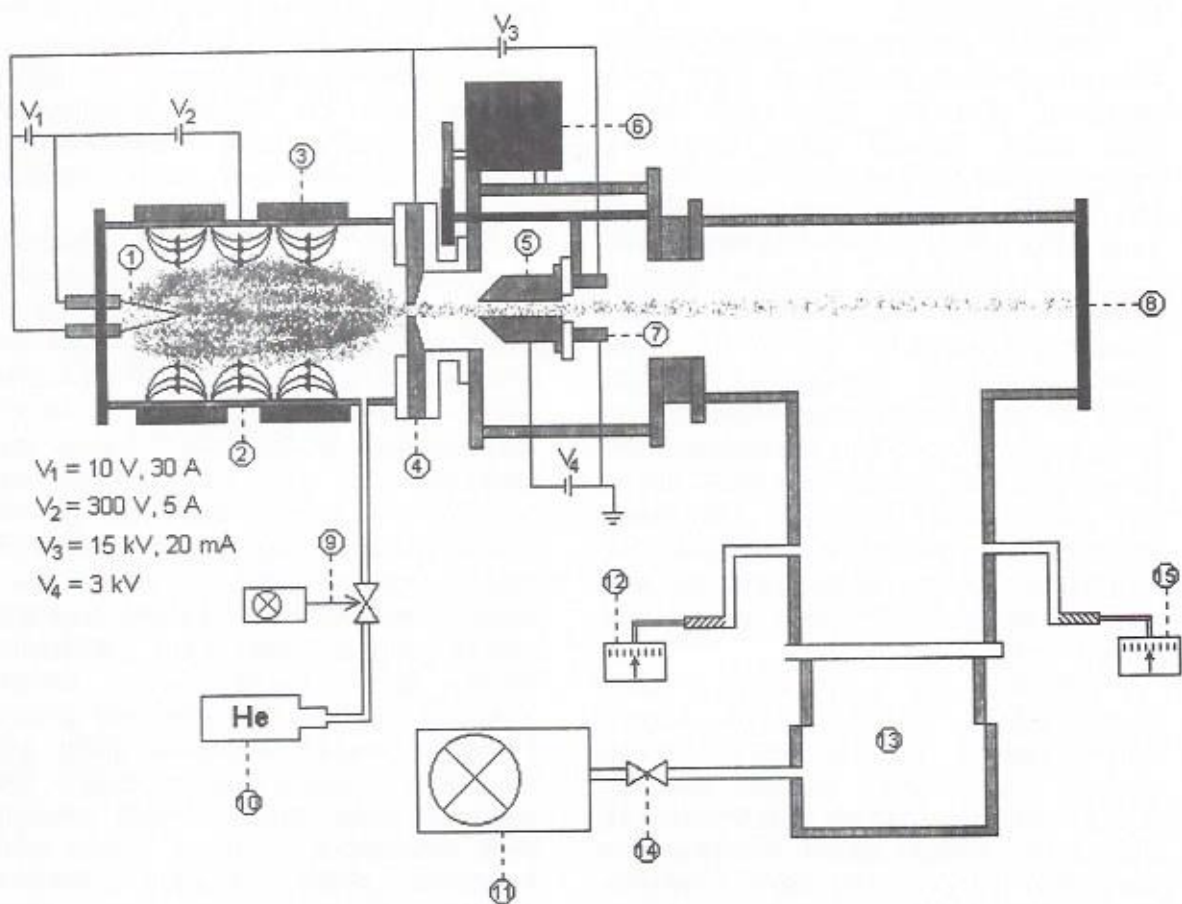
alpha, serta menghitung kerapatan ion yang akan dihasilkan.

2. TATA KERJA

2.1 SUMBER ION MULTICUSP

Secara garis besar, bagian-bagian dari sumber ion *multicusp* yang telah dibuat dapat dijelaskan sebagai berikut. Perhatikan Gambar 1, bagan desain sumber ion *multicusp*.

- Sistem pemasok gas
Sistem pemasok gas berfungsi untuk memasok gas dari tabung gas ke *plasma chamber* dengan menggunakan pipa tembaga berdiameter 1,6 mm yang dilas ke *plasma chamber*. Untuk mengatur laju aliran gas dipasang suatu katup jarum yang dikendalikan oleh motor. Kecepatan gerakan translasi jarum sekitar 0,5 mm/s dalam jangkauan 5 mm.



Keterangan:

- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| 1. Filamen (katoda) | 9. Needle valve |
| 2. Plasma chamber (anoda) | 10. Tabung gas helium |
| 3. Magnet batang | 11. Pompa mekanik |
| 4. Elektroda ekstraksi | 12. Meter pirani |
| 5. Elektroda puller | 13. Pompa turbo |
| 6. Mekanisme penggerak puller | 14. Valve vakum rendah |
| 7. Elektroda ground | 15. Penning gauge |
| 8. Target | |

Gambar 1. Bagan desain sumber ion multicusp

- Sistem pembentuk ion
Terdiri dari anoda yang berfungsi sebagai plasma *chamber*, terbuat dari pipa tembaga, di ujungnya dipasang filamen sebagai sumber elektron atau katoda yang dialiri arus 30 A pada tegangan 10 V. Untuk membentuk jaring-jaring (*cusp*) magnet, di permukaan plasma *chamber* dipasang 12 buah magnet batang. Cara kerja dari sistem pembentuk ion adalah sebagai berikut: elektron-elektron yang dihasilkan oleh filamen (katoda) akan ditarik oleh anoda. Karena pengaruh medan magnet, elektron-elektron ini akan berputar-putar di dalam plasma *chamber* dan menumbuk atom-atom gas sehingga atom-atom ini terionisasi (menghasilkan ion-ion positif). Ion-ion positif ini dan elektron-elektron dari katoda akan berputar-putar menumbuk atom-atom gas lainnya sehingga akan semakin banyak ion-ion positif yang dihasilkan.
- Sistem pembentuk berkas ion
Untuk membentuk berkas ion, di ujung plasma *chamber* dipasang elektroda ekstraksi. Untuk keluaran ion dari plasma *chamber*, pada elektroda ekstraksi dibuat lubang berdiameter 9 mm dan diberi tegangan 15 kV terhadap *ground*. Untuk menarik dan memberikan energi kinetik awal ke berkas ion positif, didekat elektroda ekstraksi dipasang elektroda *puller* (penarik ion) yang diberi tegangan -3 kV terhadap *ground*. Untuk membentuk berkas ion dengan *emitansi* yang kecil, pada elektroda *puller* dibuat lubang berdiameter 6,5 mm. Untuk optimasi pembentukan berkas ion, baik intensitas maupun *emitansinya*, elektroda *puller* dan elektroda *ground* secara bersama-sama dapat digerakan mendekati atau menjauhi elektroda ekstraksi dengan motor penggerak *puller*.
- Sistem vakum
Sistem vakum terdiri dari vakum rendah menggunakan pompa mekanik dan vakum tinggi menggunakan pompa turbo. Vakum rendah berfungsi untuk memvakumkan plasma *chamber* dan tabung akselerator pada tahap awal pemvakuman dengan kevakuman

sekitar 10^{-2} sampai 10^{-3} Torr. Sedangkan vakum tinggi berfungsi untuk memvakumkan plasma *chamber* dan tabung akselerator pada tahap lanjut dengan kevakuman sekitar 10^{-5} sampai 10^{-7} Torr. Untuk mengukur kevakuman yang dihasilkan vakum rendah digunakan meter jenis pirani dengan rentang skala 1 sampai 10^{-3} Torr, sedangkan untuk mengukur kevakuman yang dihasilkan vakum tinggi digunakan *penning gauge* dengan rentang skala 10^{-2} sampai 10^{-7} Torr.

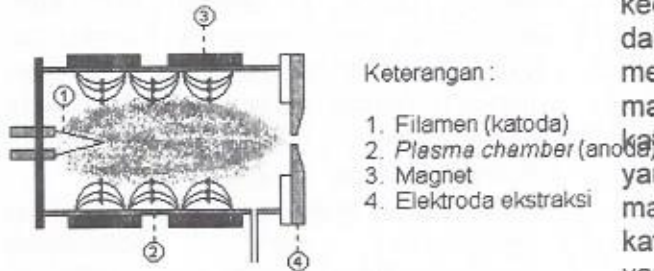
- Sumber-sumber daya kelistrikan
Ada empat buah sumber daya yang diperlukan untuk mendukung pengoperasian sumber ion *multicusp*. Keempat sumber daya tersebut mendapat input dari listrik PLN yang dikendalikan dengan variac sehingga inputnya bisa diatur dari 0 sampai 220 V.
- Pengukur Berkas Arus / Target
Suatu rumah target yang berfungsi juga sebagai pengukur arus alpha terbuat dari aluminium, terisolasi dengan *ground* oleh material pertineks. Komponen ini dihubungkan dengan sistem pendingin air.

2.2 RUANG IONISASI

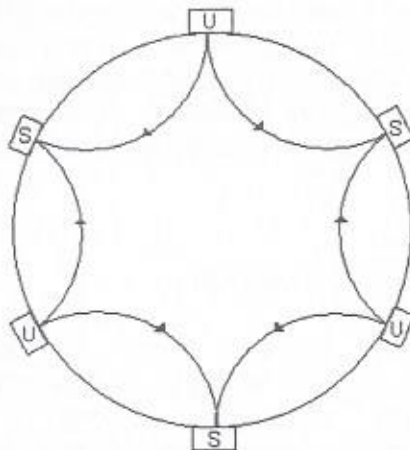
Ruang ionisasi terdiri dari tabung anoda, filamen sebagai sumber elektron (katoda), batangan magnet untuk membentuk jaring-jaring (*cusps*) medan magnet di dalam ruang ionisasi. Filamen berupa kawat *tungsten* berukuran panjang 15 cm yang terdiri dari 3 kawat berbentuk gulungan dimana masing-masing kawat berdiameter 0,75 mm. Filamen dicatu dengan arus 30 A dan beda potensial kedua ujungnya 10 V. Tabung anoda, berbentuk silinder terbuat dari tembaga dengan panjang 138 mm dan diameter dalam 98 mm. Anoda diberi potensial 300 V yang akan menarik elektron dari filamen katoda. Di bagian depan terdapat elektroda ekstraksi yang berpotensi sama dengan filamen, ini untuk mencegah elektron tertarik ke daerah ekstraksi. Di sekeliling *chamber* dipasang 12 batang magnet dari bahan $Nd_2Fe_{14}B$ berukuran 6 cm x 2 cm x 0,5 cm yang

membangkitkan jaring-jaring medan magnet untuk mengungkung plasma hasil ionisasi.

Penampang samping (tampak samping) dari ruang ionisasi ditampilkan pada Gambar 2 dan penampang depan (tampak muka) dari ruang ionisasi ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Tampak samping ruang ionisasi



Gambar 3. Tampak muka ruang ionisasi

3. PEMBAHASAN

3.1 UNJUK KERJA KATODA, ANODA, DAN MEDAN MAGNET

Seberapa besar jumlah ionisasi yang mampu dihasilkan oleh sumber ion sangat tergantung pada unjuk kerja dari katoda dalam memasok elektron, anoda dalam menarik elektron dari katoda dan memberi energi kinetik kepada elektron untuk mengionisasi partikel-partikel gas dalam ruang ionisasi, dan medan magnet permanen dalam memberi gaya Lorentz

pada elektron sehingga elektron berputar-putar di dalam ruang ionisasi dan tidak langsung menumbuk dinding anoda. Ketiga parameter inilah yang menentukan dan saling mempengaruhi unjuk kerja sumber ion dalam menghasilkan ion.

Besar kecilnya jumlah elektron yang dipasok katoda tergantung pada besar kecilnya kuat arus listrik yang mengalir dalam filamen katoda. Jika kuat arus yang mengalir dalam filamen katoda besar, maka jumlah elektron yang dipasok katoda besar dan sebaliknya jika kuat arus yang mengalir dalam filamen katoda kecil, maka jumlah elektron yang dipasok katoda juga kecil. Jadi jumlah elektron yang dipasok katoda berbanding lurus dengan kuat arus yang mengalir dalam filamen katoda. Kemudian besar kecilnya jumlah elektron yang dipasok katoda akan menentukan banyak sedikitnya ionisasi yang terjadi dalam plasma chamber melalui peristiwa tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas. Dalam hal ini tumbukan yang mampu menghasilkan ion adalah jika energi kinetik elektron lebih besar dari energi ionisasi dari partikel-partikel gas. Walaupun jumlah elektron yang dipasok katoda banyak, tetapi jika energi kinetik dari masing-masing elektron lebih kecil dari energi ionisasi partikel-partikel gas, maka tumbukan antara elektron dan partikel-partikel gas tidak mampu menghasilkan ion, melainkan hanya mampu mengeksitasi elektron dari partikel-partikel gas. Jadi ionisasi dalam jumlah besar terjadi jika elektron-elektron yang dipasok katoda dalam jumlah banyak dan energi kinetik dari tiap elektronnya lebih besar dari energi ionisasi partikel-partikel gas.

Besar kecilnya energi kinetik elektron E_k yang lepas dari permukaan filamen katoda dan berputar-putar di dalam ruang ionisasi bergantung pada besar kecilnya beda potensial V antara anoda dan katoda sesuai dengan rumus $E_k = qV$ dimana q adalah besar muatan elektron [4]. Makin besar beda potensial antara anoda dan katoda, makin besar pula energi kinetik elektron yang terlepas dari katoda yang berarti kemampuan mengionisasi dari elektron tersebut akan meningkat.

Sebaliknya makin kecil beda potensial antara anoda dan katoda, makin kecil pula energi kinetik elektron yang terlepas dari katoda yang berarti kemampuan mengionisasi dari elektron tersebut akan turun. Akan tetapi bukan berarti makin besar beda potensial antara anoda dan katoda maka kemampuan mengionisasinya akan lebih baik, karena jika beda potensial V antara anoda dan katoda diperbesar, maka jari-jari lintasan elektron bertambah besar sehingga akan meningkatkan probabilitas elektron menumbuk dinding anoda yang berarti akan mengurangi jumlah tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas dalam ruang ionisasi. Adapun jari-jari lintasan elektron r dalam plasma chamber karena mendapat gaya Lorentz dari medan magnet B dirumuskan sebagai

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}} \dots\dots (1)$$

dimana m adalah massa elektron, q adalah muatan elektron, dan V adalah beda potensial antara anoda dan katoda [4]. Dari rumus (1) dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan jumlah tumbukan efektif antara elektron dan partikel-partikel gas dalam ruang ionisasi diperlukan harga V dan B yang optimum yang perlu dikaji lebih lanjut.

3.2 PERHITUNGAN DAN ANALISIS JUMLAH IONISASI DAN RAPAT ION YANG DIHASILKAN

Katoda sebagai sumber elektron terbuat dari filamen tungsten dengan panjang 150 mm terdiri dari 3 kawat berbentuk gulungan di mana masing-masing kawat berdiameter 0,75 mm. Filamen tungsten ini selama dialiri arus listrik berpijar menghasilkan nyala yang sangat terang, sehingga elektron-elektron yang mengalir dalam katoda tereksitasi dan mudah ditarik lepas dari katoda.

Pertama akan dihitung seberapa besar catu elektron dari katoda yang akan ditarik anoda dan kemudian mengionisasi partikel-partikel gas dalam ruang ionisasi. Berdasarkan pengertian kuat arus listrik sebesar 1 A adalah aliran muatan (dalam

hal ini aliran elektron) sebesar 1 C dalam penghantar selama 1 detik, maka jika dalam katoda mengalir kuat arus listrik sebesar 30 A berarti terjadi aliran muatan elektron sebesar 30 C/detik. Karena muatan 1 elektron sebesar $1,6 \times 10^{-19}$ C, maka jumlah elektron yang membawa muatan 30 C/detik dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$q = n e \dots\dots\dots (2)$$

dengan q besar muatan listrik yang dilalirkan dalam satuan coulomb, n jumlah elektron yang dialirkan, dan e besar muatan elektron yaitu $1,6 \times 10^{-19}$ C.

Dari rumus (2) tersebut, untuk $q = 30$ C/detik dan $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, maka jumlah elektron yang mengalir dalam katoda adalah $n = q/e = 30 \text{ Cs}^{-1} / (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 18,75 \times 10^{19}$ elektron/detik. Jika diasumsikan 10% dari semua elektron yang mengalir di katoda ini mampu ditarik oleh anoda, maka setiap detik di ruang ionisasi akan ada elektron yang berputar-putar sebanyak $1,875 \times 10^{19}$ elektron.

Kedua akan dihitung seberapa besar energi elektron yang terlepas dari katoda dan berputar-putar di dalam ruang ionisasi untuk mengionisasi partikel-partikel gas di dalam *chamber*. Elektron bermuatan negatif yang mengalir di katoda akan ditarik oleh anoda yang bermuatan listrik positif, sehingga elektron tersebut akan bergerak dipercepat karena mendapat percepatan dari medan listrik antara anoda (positif) dan katoda (negatif). Jika di dalam ruang ionisasi tidak ada jaring-jaring (*cusp*) medan magnet, maka elektron dari katoda akan bergerak lurus dipercepat dan menumbuk anoda dengan energi kinetik saat menumbuk anoda sama besar dengan energi potensial listrik elektron karena adanya beda potensial antara anoda dan katoda (hal ini sesuai dengan hukum kekekalan energi). Tetapi karena di dalam ruang ionisasi terdapat jaring-jaring (*cusp*) medan magnet, maka elektron yang terlepas dari anoda akan dibelokkan oleh gaya Lorentz dan berputar-putar di dalam ruang ionisasi. Ketika elektron masih berada di katoda energi kinetiknya nol, sedangkan (diandaikan tidak ada medan magnet) ketika elektron menumbuk anoda energi

kinetiknya sama besar dengan energi potensial listrik, maka energi kinetik elektron di dalam ruang ionisasi sebelum terjadi tumbukan dengan partikel-partikel gas dapat dianggap rata-rata dari kedua energi kinetik tersebut, yaitu :

$$E_{K \text{ e di ruang ionisasi}} = \frac{1}{2} (E_{K \text{ e di kat}} + E_{K \text{ e di an}}) \quad (3)$$

$$E_{K \text{ e di ruang ionisasi}} = \frac{1}{2} (0 + E_{P \text{ listrik e}}) \dots\dots\dots (4)$$

$$E_{K \text{ e di ruang ionisasi}} = \frac{1}{2} qV \dots\dots\dots (5)$$

Jika harga $q = e$ dan $V = 300 \text{ V}$ dimasukkan ke dalam rumus (5) di atas, maka didapat harga $E_{K \text{ e di ruang ionisasi}} = 150 \text{ eV}$. Energi kinetik sebesar 150 eV inilah yang digunakan elektron untuk mengionisasi partikel-partikel gas di dalam ruang ionisasi.

Ionisasi gas hidrogen atau gas deuterium menjadi proton atau deutron

Semua perhitungan dan analisis berikut ini adalah dengan asumsi 10% elektron dari katoda mampu ditarik oleh anoda. Semua elektron yang lepas dari katoda berputar-putar di dalam ruang ionisasi dan mengionisasi partikel-partikel gas dalam ruang ionisasi tersebut sampai energinya habis. Dengan kata lain tidak ada elektron yang menumbuk dinding anoda sebelum energinya habis karena bertumbukan dengan partikel-partikel gas hidrogen (H_2) atau gas deuterium (D_2). Energi ionisasi dari gas hidrogen atau gas deuterium adalah 37 eV [5], artinya untuk mengionisasi gas hidrogen atau gas deuterium menjadi proton atau deutron dibutuhkan energi minimum sebesar 37 eV. Padahal energi kinetik rata-rata elektron yang terlepas dari katoda karena tarikan anoda adalah sebesar 150 eV. Hal ini berarti sebuah elektron dapat mengionisasi partikel-partikel gas hidrogen atau gas deuterium sebanyak 4 kali (dari 150 eV dibagi 37 eV) sebelum kehabisan energi kinetiknya. Karena jumlah elektron yang dipasok katoda ke ruang ionisasi sebesar $1,875 \times 10^{19}$ elektron perdetik, sedangkan setiap elektron mampu menghasilkan tumbukan efektif dengan partikel-partikel gas hidrogen atau gas deuterium sebanyak 4 kali dan setiap partikel gas hidrogen atau gas deuterium yang terionisasi menghasilkan 2 buah

proton atau deutron, maka jumlah proton atau deutron perdetik yang dihasilkan dapat dihitung, yaitu sebesar $4 \times 2 \times 1,875 \times 10^{19}$ proton atau deutron perdetik = $1,5 \times 10^{20}$ proton atau deutron perdetik. Rapat proton atau deutron dalam ruang ionisasi adalah jumlah proton atau deutron per cm^3 volume ruang ionisasi. Volume ruang ionisasi dapat dihitung dengan rumus volume tabung, yaitu

$$V = \pi r^2 t \dots\dots\dots (6)$$

dimana $\pi = 3,14$, $r =$ jari-jari dalam ruang ionisasi (9,8 cm), dan $t =$ tinggi atau panjang tabung ruang ionisasi (13,8 cm). Setelah dihitung didapat harga $V = 4161,6 \text{ cm}^3$, sehingga rapat proton atau deutron dalam ruang ionisasi adalah = $(1,5 \times 10^{20} \text{ proton atau deutron perdetik}) / (4161,6 \text{ cm}^3)$ atau sebesar $3,6 \times 10^{16}$ ion per cm^3 perdetik. Hasil ini adalah hasil maksimum, karena sebenarnya tidak semua elektron akan mengionisasi gas hidrogen menjadi proton atau mengionisasi gas deuterium menjadi deutron. Ada sebagian elektron yang hilang karena menumbuk dan terserap oleh anoda. Tapi hal ini dikompensasi oleh tumbukan proton dengan gas hidrogen atau tumbukan deutron dengan gas deuterium yang akan mengionisasinya menjadi proton atau deutron.

Ionisasi gas helium menjadi alpha

Jika ke dalam *plasma chamber* atau ruang ionisasi dipasok gas helium, maka akan dihasilkan ion alpha. Energi ionisasi dari gas helium adalah 46 eV [5]. Dengan perhitungan yang sama seperti di atas, maka setiap elektron yang berputar-putar dalam ruang ionisasi akan mampu mengionisasi partikel-partikel gas helium menjadi alpha sebanyak 3 kali (dari 150 eV dibagi 37 eV) sebelum elektron tersebut kehabisan energinya. Berbeda dengan gas hidrogen yang diatomik (setiap partikel gas hidrogen terdiri dari 2 atom hidrogen), gas helium adalah gas monoatomik (setiap partikel gas helium hanya terdiri dari 1 atom helium), sehingga setiap ionisasi partikel gas helium hanya menghasilkan satu ion alpha. Dengan demikian, maka jumlah ion

alpha yang dihasilkan perdetiknya adalah $= 3 \times 1 \times 1,875 \times 10^{19}$ alpha perdetik $= 5,625 \times 10^{19}$ alpha perdetik dan rapat ion alpha dalam ruang ionisasi adalah $= (5,625 \times 10^{19} \text{ alpha perdetik}) / (4161,6 \text{ cm}^3)$ atau sebesar $1,35 \times 10^{16}$ alpha per cm^3 perdetik. Seperti halnya kerapatan proton atau deuteron, kerapatan alpha ini juga merupakan kerapatan maksimum, karena sebenarnya tidak semua elektron akan mengionisasi gas helium menjadi alpha. Akan selalu ada sebagian elektron yang hilang karena menumbuk dan terserap oleh anoda. Tapi hal ini dikompensasi oleh tumbukan alpha dengan gas helium yang akan mengionisasi gas helium menjadi alpha.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa sumber ion *multicusp* hasil rekayasa dapat menghasilkan proton jika dipasok gas hidrogen, dapat menghasilkan deuteron jika dipasok gas deuterium, dan dapat menghasilkan alpha jika dipasok gas helium. Sumber ion tersebut mampu menghasilkan proton atau deuteron dengan kerapatan maksimum $3,6 \times 10^{16}$ ion per cm^3 perdetik dan menghasilkan alpha dengan kerapatan maksimum $1,35 \times 10^{16}$ alpha per cm^3 perdetik.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

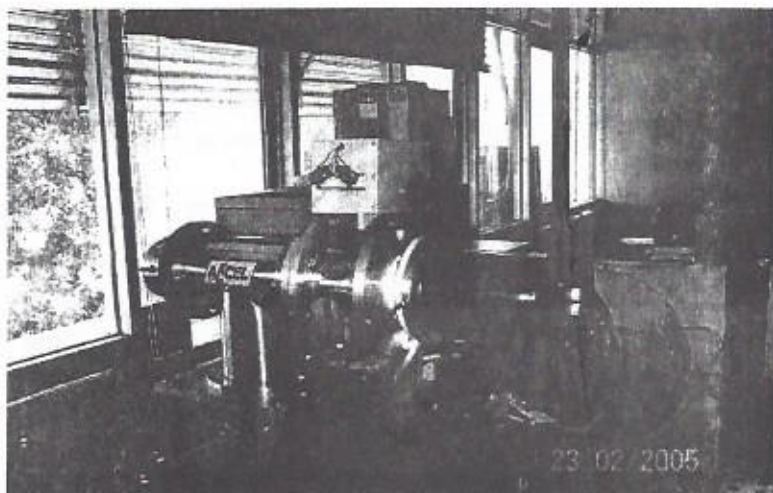
Dengan selesainya penulisan makalah ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Bapak Silakhuddin, Mantan Kepala Bidang Akselerator Zarah Energi Tinggi P2SRM-BATAN atas kerja samanya dalam perencanaan, perancangan, dan perekayasaan sumber ion multicusp untuk ADS skala kecil di P2SRM dari tahun 2003 sampai tahun 2005.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. H. OGURI et al, Development of a High Brightness Negative Ion Source (Proceeding of 10th Symposium on Acc. Science and Tech., Hitachinaka, Japan, 1995 October 25 – 27) (1995)
2. R. LIMPAECHER AND K.R. MAC KANZIE, Rev. Sci. Instrument. 44, 726 (1973)
3. K.N. LEUNG et al, Phys. Lett. A51, 490 (1975)
4. SILAKHUDDIN, KASMUDIN, DAN SUHARNO, Analisis Kemampuan Pengungkungan Medan Magnet pada Sumber Ion Multicusp Hasil Rekayasa, (Prosiding PPI-PDIPTN, 12 Juli 2005, P3TM-BATAN, Yogyakarta) (2005).
5. ANONYMOUS, An Introduction to Gas Detectors, An IAEA Training Course for The Maintenance of Nuclear Electronic System.

7. LAMPIRAN

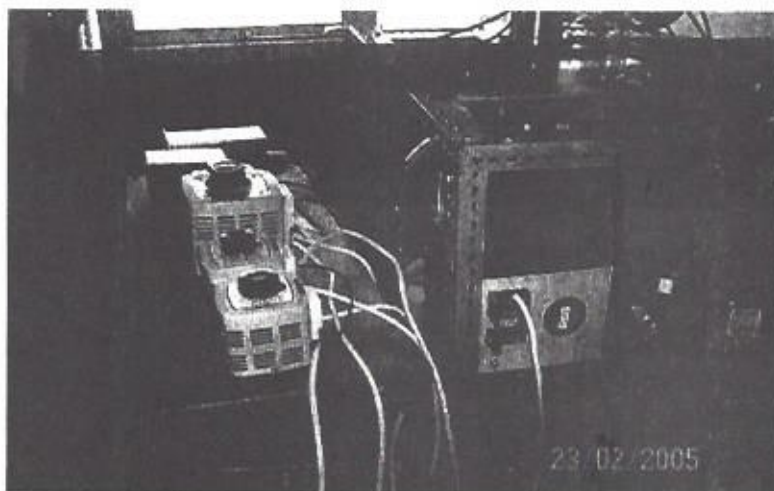
Di bawah ini ditunjukkan gambar foto sumber ion multicusp untuk alpha.



Gambar 3.
Sumber ion multicusp



Gambar 4.
Variac sumber daya
 V_1 , V_2 , V_3 , dan V_4



Gambar 5.
Sumber daya kelistrikan