

PERHITUNGAN EFEK TINGKAT KEVAKUMAN PADA BEAM LOSS DI DALAM TANGKI SIKLOTRON

Silakhuddin, Sunardi dan Emy Mulyani

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN

Email: silakh@batan.go.id

ABSTRAK

PERHITUNGAN EFEK TINGKAT KEVAKUMAN PADA BEAM LOSS DI DALAM TANGKI SIKLOTRON Fenomena *beam loss* dalam siklotron adalah hilangnya sebagian atau seluruh berkas ion selama pemercepatan sirkular yang pada siklotron energi rendah diakibatkan oleh tumbukan ion-ion dengan molekul-molekul gas sisa di dalam tangki siklotron. Kebolehjadian terjadinya *beam loss* tersebut tergantung atas panjang lintasan dan kerapatan molekul. Nilai panjang lintasan dapat disajikan ke radius lintasan dan kerapatan molekul dapat diwakili oleh tingkat kevakuman di dalam tangki siklotron. Nilai kebolehjadian *beam loss* pada suatu radius dapat disajikan dalam nilai prosentase antara besar arus berkas ion pada radius tersebut dengan nilai berkas arus berkas ion pada suatu radius acuan di pusat siklotron, Nilai prosentase tersebut dinamai koefisien transmisi berkas. Dengan mengambil nilai acuan radius $r_0 = 2,3$ cm, telah dilakukan perhitungan nilai koefisien transmisi pada beberapa radius untuk tingkat kevakuman yang berbeda. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai koefisien transmisi pada radius ekstraksi adalah 90% pada tingkat kevakuman 1×10^{-6} Torr dan menjadi hanya 50% bila tingkat kevakuman 5×10^{-6} Torr.

Kata kunci: *Beam loss*, siklotron, kevakuman, koefisien transmisi.

ABSTRACT

CALCULATION OF EFFECT OF LEVEL VACUUM TO THE BEAM LOSS ON THE CYCLOTRON

TANK. Phenomenon of *beam loss* in the cyclotron is the loss of some or all of the ion beam during circular acceleration which in the low energy cyclotron this is caused by collisions between ions and residual gas molecules in the cyclotron tank. The probability of the occurrence of the loss depends on the beam path length and density of the molecules. Path length value can be presented to a radius of the circle and density of the molecules can be represented by the level of vacuum in the cyclotron tank. Value of the probability of loss on some radius can be expressed in value between the percentage of the ion beam current at the radius to the ion beam current at a reference radius in the cyclotron center. The percentage value is called the transmission coefficient. By taking the value of the reference radius $r_0 = 2.3$ cm, the transmissions coefficient have been calculated at some value of radius for different vacuum levels. The calculations showed that the value of the transmission coefficient on the extraction radius is 90% when the vacuum level of 1×10^{-6} Torr and to be only 50% when the vacuum level of 5×10^{-6} Torr.

Keywords: *Beam loss*, cyclotron, vacuum, transmission coefficient.

PENDAHULUAN

Sebagian besar siklotron proton saat ini memanfaatkan model pemercepatan ion H⁺ yang kemudian setelah mencapai energi maksimum yaitu pada radius ekstraksi berkas ion tersebut diekstraksi dalam bentuk berkas proton menggunakan foil karbon. Idealnya semua berkas ion tersebut 100% akan sampai hingga radius ekstraksi, tetapi dalam praktiknya hilangnya berkas atau *beam loss* akan terjadi. *Beam loss* dapat diakibatkan oleh karena proses *beam dynamics* dan karena *stripping*. Proses yang pertama adalah akibat ketidaksempurnaan dari optika sehingga amplitudo gerakan berkas ion terlampaui besar, terutama amplitudo vertikal, sehingga berkas sebagian menumbuk komponen siklotron. Proses *stripping* adalah terkelupasnya elektron dari ion H⁺ dan kemudian ion tersebut menjadi atom H netral sehingga lepas dari pemercepatan sirkular. Bila desain optika berkas

sudah bagus (seperti pada umumnya siklotron komersial) maka *beam loss* akibat *stripping* menjadi hal yang harus diperhatikan dalam operasi siklotron.

Atom netral yang terbentuk tersebut gerakannya tak dapat dikendalikan lagi dan masih mempunyai energi yang bila menumbuk komponen siklotron akan menimbulkan reaksi nuklir yang dapat terbentuknya radionuklida pada komponen tersebut. Sebagian dari radionuklida tersebut dapat berpotensi menghasilkan paparan radiasi gamma residu yang cukup berarti dan harus menjadi perhatian. Tumbukan atom netral tersebut pada komponen-komponen siklotron juga akan menimbulkan *degassing* yang menambah semakin rendahnya tingkat kevakuman.

Dari uraian di atas, maka ada dua kerugian langsung akibat proses *stripping loss* yaitu berkurangnya berkas yang dihasilkan oleh siklotron dan potensi timbulnya paparan radiasi di dalam

tangki siklotron. Kerugian tak langsung adalah membuat rendahnya kevakuman tangki yang menambah pada kerugian tak langsung tersebut. Potensi kerugian-kerugian tersebut dapat dikurangi atau dibuat sekecil mungkin apabila dapat menjaga kevakuman di dalam tangki siklotron setinggi mungkin. Suatu kajian yang dilakukan melalui perhitungan untuk menentukan korelasi antara tingkat kevakuman dengan besarnya *stripping loss* penting dilakukan sehingga dapat ditentukan tingkat kevakuman yang dapat ditoleransi.

TEORI

Proses Stripping

Stripping ada dua jenis yaitu *Lorentz stripping* yaitu akibat gaya Lorentz yang mengakibatkan terkelupasnya elektron dan *gas stripping* yaitu akibat tumbukan ion dengan molekul-molekul gas residu sehingga elektron terkelupas. *Lorentz stripping* akan nyata terjadi pada energi ion yang tinggi atau medan magnet yang tinggi. Sebagai ilustrasi, untuk energi ion 30 MeV *stripping* ini akan nyata pada medan magnet di atas 2 T dan untuk medan magnet sekitar 1,2 T baru akan terjadi pada energi ion mulai 70 MeV^[1]. Sebaliknya *gas stripping* akan lebih nyata terjadi pada energi ion yang lebih rendah dan tidak bergantung pada medan magnet. Data yang dibuat oleh NAKAI dkk menunjukkan bahwa tampang lintang reaksi *stripping* ion H dengan N₂ pada energi 1 MeV adalah 100 kali lebih besar dibanding pada energi 100 MeV^[2].

Formulasi Perhitungan Beam Loss Karena Gas Stripping

Besarnya bagian arus berkas ion yang hilang setelah melintas sepanjang dl yaitu dI bergantung pada besaran-besaran arus berkas I , rapat molekul gas residu per satuan volum n , tampang lintang *stripping*, dan dl , sehingga dapat diformulasikan sebagai

$$-dI = I n \sigma dl \quad (1)$$

Setelah diintegrasikan dengan posisi lintasan $l=0$ hingga $l=L$, persamaan tersebut akan berbentuk

$$I_L = I_0 e^{-\int_0^L n(l)\sigma(l)dl} \quad (2)$$

Dengan asumsi bahwa n dan σ konstan (tidak bergantung l) maka persamaan (2) menjadi

$$I_L = I_0 e^{-n\sigma L} \quad (3)$$

Dengan menggunakan formulasi gas ideal yaitu

$$N = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

di mana N rapat molekul dalam mole, P tekanan gas, R konstanta gas ideal dan T suhu gas. Selanjutnya dengan mengganti rapat molekul per volum $n = NA$ di mana A bilangan Avogadro maka persamaan (3) dapat ditulis sebagai

$$I_L = I_0 e^{-\frac{AP\sigma L}{RT}} \quad (5)$$

Jika dimasukkan besaran-besaran $A = 6,022 \times 10^{23}$ molekul per mole, $R = 62360 \text{ cm}^3 \text{ Torr/mole K}$ dan $T = 300 \text{ K}$ serta dengan membuat P dalam Torr, dalam cm^2 dan L dalam cm, maka persamaan (5) dapat ditulis sebagai

$$I_L = I_0 e^{-3,2 \times 10^{16} P \sigma L} \quad (6)$$

Didefinisikan koefisien transmisi yaitu perbandingan antara berkas ion pada posisi L dibanding posisi 0 sebagai

$$T_L = \frac{I_L}{I_0} = e^{-3,2 \times 10^{16} P \sigma L} \quad (7)$$

Dalam hal ini P dalam Torr, σ dalam cm^2 dan L dalam cm.

TATA KERJA

1. Program Komputer Simulasi Lintasan Berkas Ion

Untuk menghitung panjang lintasan (L) pada radius tertentu dikerjakan dengan cara menjumlahkan panjang keliling lintasan-lintasan berkas sebelumnya. Untuk itu harus diketahui dulu posisi-posisi berkas melintas, yakni pada nilai radius berapa saja, dan hal ini tidak mudah dengan perhitungan analitik. Suatu program simulasi lintasan berkas ion yang bernama *pwheel* digunakan untuk menentukan posisi dan bentuk lintasan berkas ion tersebut.

Program *pwheel* merupakan program simulasi lintasan partikel yang telah lama digunakan dan dikembangkan oleh desainer siklotron di Korea^[3]. Di dalam program tersebut sudah diformulasikan penyelesaian persamaan diferensial secara numerik dengan metode *Runge-Kutta*. *Input* yang diperlukan adalah data-data: pemetaan medan magnet dan potensial listrik, frekuensi RF, tegangan RF, massa ion, muatan ion, energi awal ion, posisi awal berkas (x, y, z) dan fase awal. Keluaran dari program *pwheel* berupa gambar lintasan berkas dan data-data numerik titik-titik posisi lintasan berkas.

2. Penentuan Panjang Lintasan

Dari data-data numerik hasil simulasi *pwheel* kemudian ditentukan nilai radius di mana posisi berkas melintas di sepanjang garis radial dari pusat lintasan dalam hal ini diambil arah tegak lurus dari sumbu *dee*. Setelah diketahui nilai-nilai radius tersebut maka dihitung kelilingnya yaitu sebesar $2 r$, dan panjang lintasan berkas sampai dengan posisi suatu radius adalah:

$$L_r = \sum_{r_0}^r 2\pi r \quad (8)$$

dengan r_0 radius di daerah pusat siklotron tempat dimana arus ion diekstraksi oleh *puller* dan melakukan gerakan siklik pertama, yang dalam perhitungan ini diambil pada radius 2,13 cm. Selanjutnya dihitung L_r untuk setiap kelipatan radius

5 cm hingga radius ekstraksi 40 cm yang bersesuaian dengan energi maksimum ion sebesar 13 MeV.

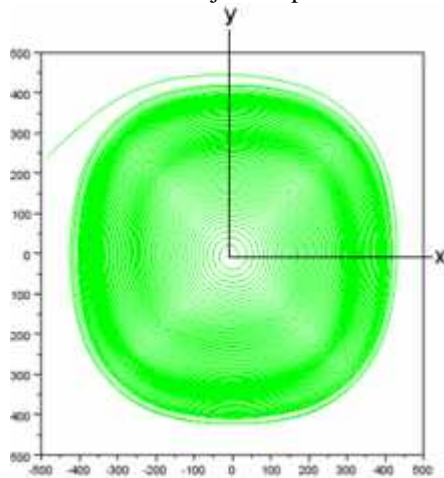
3. Perhitungan Koefisien Transmisi Berkas Ion

Dalam hal ini akan dihitung efek tingkat kevakuman yaitu tekanan gas residu terhadap koefisien transmisi sebagai representasi dari *beam loss* di dalam tangki siklotron. Formula yang digunakan adalah seperti pada persamaan (7) untuk berbagai posisi L dengan variasi tekanan P . Dengan menganggap bahwa sebagian besar gas residu adalah mengandung molekul N_2 dan O_2 , maka berdasarkan pustaka 2 nilai tampang lintang *stripping* dari H^+ untuk kedua molekul gas sama dan diambil konstan (tidak bergantung energi ion) yaitu $\sigma = 3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Lintasan Berkas Ion

Dalam simulasi dengan *pwheel* ditetapkan sebagai sumbu x adalah arah sumbu *dee* dan sumber ion dipasang secara radial pada sumbu y arah negatif. Data-data yang dimasukkan adalah massa ion H^+ $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, muatan ion $-1,602 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$, frekuensi RF 77,58 MHz, tegangan *dee* 45 kV. Data-data medan listrik dan medan magnet menggunakan data dari desain siklotron KIRAMS 13. Fase awal ion -70° . Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil simulasi lintasan berkas

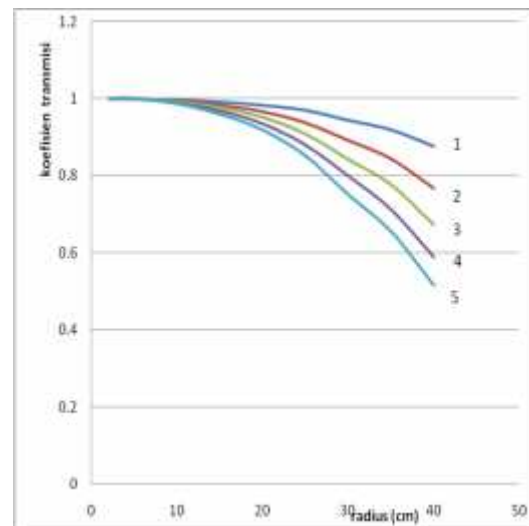
Posisi $x=0$ atau sepanjang sumbu y positif sebagai posisi yang akan dijadikan obyek perhitungan. Dari sekian banyak titik koordinat kemudian dipilih titik-titik yang nilai x nya nol atau mendekati nol dan nilai y pada titik tersebut dianggap sebagai nilai r . Data numerik dari nilai-nilai r tidak dicantumkan pada makalah ini karena memerlukan banyak tempat.

Hasil Perhitungan Panjang Lintasan dan Transmisi Berkas Ion

Setelah diperoleh nilai-nilai r dari data numerik hasil simulasi lintasan berkas kemudian diperoleh nilai panjang lintasan L_r berdasarkan persamaan 8. Hasil perhitungan panjang lintasan L_r untuk setiap kelipatan radius 5 cm ditunjukkan pada Tabel 1 dan koefisien transmisinya berdasarkan persamaan (7) untuk berbagai nilai kevakuman P ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Nilai panjang lintasan ion pada setiap radius 5 cm

r (cm)	L_r (cm)
5	61,11
10	277,18
15	853,59
20	1754,33
25	3341,49
30	5960,88
35	8827,20
40	13813,66



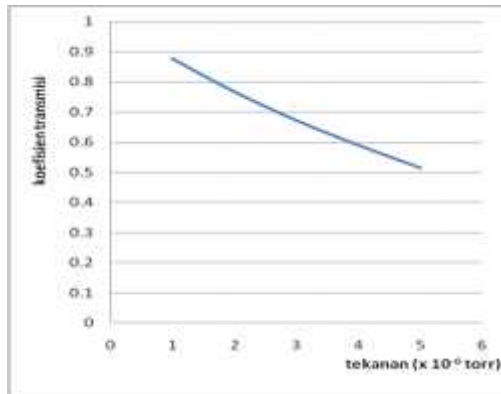
Gambar 2. Kurva koefisien transmisi berkas ion sebagai fungsi radius untuk kevakuman: 1, 2, 3, 4 dan 5 dalam 10^{-6} Torr .

Tampak dari kurva tersebut bahwa tingkat kevakuman sangat berpengaruh besar pada transmisi berkas ion. Pada umumnya siklotron komersial mempunyai angka koefisien transmisi pada radius ekstraksi sekitar 90% [4], ini berarti bahwa tingkat kevakuman harus terjaga pada $1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$. Tingkat kevakuman tersebut adalah setelah gas hidrogen diinjeksikan ke sumber ion, berarti diperlukan tingkat kevakuman pada level 10^{-7} Torr sebelum operasi berkas ion.

Bentuk dari kurva untuk semua tekanan tidak menunjukkan eksponensial turun sebagaimana yang seharusnya mengikuti persamaan (7), hal ini disebabkan diagram pada Gambar 2 absisnya adalah

nilai r sedangkan kurva dibuat berdasar persamaan 7 yang basisnya adalah nilai L_r yang nilainya tidak linear dengan nilai r (lihat persamaan (8)). Kurva hubungan antara koefisien transmisi dengan radius lebih menyerupai fungsi cosinus seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pengaruh tingkat kevakuman terhadap koefisien transmisi pada radius 40 cm ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva koefisien transmisi berkas ion sebagai fungsi kevakuman pada radius 40 cm

Bentuk kurva yang ditunjukkan pada Gambar 3 berbentuk eksponensial sebagaimana diharapkan dari persamaan 7. Degradasi koefisien transmisi sangat nyata dengan menurunnya kevakuman. Jika kevakuman terbiarkan hingga 5×10^{-6} Torr maka 50% berkas akan hilang pada radius ekstraksi. Pada kondisi ini bukan saja ketidakefisienan operasi siklotron tetapi akan memberikan dampak buruk bagi keselamatan karena paparan radiasi di dalam tangki siklotron menjadi tinggi.

KESIMPULAN

Kehilangan berkas pada operasi siklotron 13 MeV lebih didominasi karena *gas stripping* dibandingkan *Lorentz stripping*. Perhitungan yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa nilai koefisien transmisi berkas ion sebagai fungsi radius berbentuk kurva yang melengkung ke bawah, menyerupai kurva sinus. Untuk memperoleh koefisien transmisi sekitar 90% pada radius ekstraksi maka diperlukan kevakuman minimum 1×10^{-6} Torr, dan pada tingkat kevakuman 5×10^{-6} Torr berkas hilang sudah mencapai 50%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Prof. Dr. Pramudita Anggraita yang telah membimbing penulis ketiga Emy Mulyani dalam penggunaan program pwheel sehingga didapat data-data posisi lintasan berkas. Kepada beliau juga disampaikan terima kasih atas masukannya dalam penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. T. Zhang et al, (2009), *Beam Loss By Lorentz Stripping and Vacuum Dissociation in a 100 MeV Compact H Cyclotron*, Proceedings of 23rd Particle Accelerator Conference, Vancouver.
2. Y. Nakai et al, (1987), *Cross sections for charge transfer of hydrogen atoms and ions colliding with gaseous atoms and molecules*, Elsevier Publications: Atomic Data and Nuclear Data Tables 37, p 69-101.
3. Moohyun Yoon, (2012), *Central Region Design and Beam Dynamics*, Presented Papers at BATAN Accelerator School, PTAPB BATAN Yogyakarta.
4. V. Nutten et al, (2010), *Cyclotron Vacuum Model and H Gas Stripping Losses*, Proceedings of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China.

TANYA JAWAB

Yunanto

- Untuk mencapai kevakuman 10^{-7} sebelum gas dimasukan dan tingkat kevakuman 10^{-6} di mesin siklotron apa mudah dilakukan ?
- Tingkat kevakuman yang hanya 10^{-5} apa masih bisa menghasilkan isotop ?

Silakhuudin

- Berdasarkan pengalaman operasi pada mesin siklotron Serpong, bila kevakuman awal 1×10^{-7} Torr maka setelah gas hidrogen 5 cc/menit dimasukan ke sumber ion maka kevakuman ditangki siklotron menjadi 10^{-6} Torr
- Tingkat kevakuman yang rendah misal daerah 10^{-5} Torr, beam loss akan lebih dari 50%, berakibat radioisotop yang dihasilkan jauh berkurang

Tri Mardji Atmono

- Secara eksplisit orang sudah tahu bahwa makin tinggi derajat kevakuman maka tentu saja akan makin kecil beam lossnya. Apa ada maksud/tujuan lain dari penelitian tersebut ?
- Apabila beam loss hanya disebabkan oleh derajat kevakuman yang kurang, atau bisa terjadi juga karena interaksi dengan partikel lainnya?
- Bagaimana cara mengukur beam loss secara langsung?
- Bukankah pada eksperimen digunakan/diambil derajat kevakuman yang paling tinggi? Tentu akan menghasilkan beam loss yang kecil.

Silakhuudin

- Dengan dilakukan perhitungan maka dapat diketahui beam loss secara kuantitatif (relatif terhadap posisi tertentu)

-
- *Beam loss dapat juga karena gesekan antar lintasan berkas karena celah diantara lintasan yang sempit. Tetapi dengan membuat tegangan dll besar maka jarak antar lintasan berkas dapat diperlebar dan beam loss karena gesekan antar lintasan dapat dicegah.*
 - *Beam loss dapat diukur menggunakan beam probe yang movable dalam arah radial. Sehingga dapat diukur arus berkas disuatu radius.*
 - *Betul, dan jawabanya seperti pertanyaan pertama.*