

PERHITUNGAN PARAMETER FISIS SISTEM EKSTRAKTOR SIKLOTRON 13 MeV UNTUK PET

Widdi Usada, Ihwanul Aziz

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Jogjakarta 55010,
e-mail : w_usada@yahoo.com

Diterima 29 April 2011, diterima dalam bentuk perbaikan 19 Mei 2011, disetujui 14 Juni 2011

ABSTRAK

PERHITUNGAN PARAMETER FISIS SISTEM EKSTRAKTOR SIKLOTRON 13 MeV UNTUK PET. Telah dilakukan perhitungan parameter fisis sistem ekstraktor siklotron 13 MEV untuk PET. Untuk medan magnet rata-rata 1,275 T, maka posisi ekstraktor sekitar 40,4 cm dari pusat siklotron. Untuk tegangan dee 40 kV dan sudut dee 40° , diperoleh perolehan energi setiap putaran sebesar 159 keV, jumlah putaran 81 dan jarak antara putaran 5 mm. Parameter jarak ini sangat diperlukan untuk menentukan lebar ukuran foil ekstraktor. Hasil perhitungan deposisi energi pada foil menunjukkan bahwa untuk arus berkas proton 20 μA , dan tampang lintang berkas 0.9 cm^2 , diperoleh umur foil sekitar 56 detik.

Kata kunci : Siklotron, proton, ekstraksi, stripper, foil karbon

ABSTRACT

PHYSICAL PARAMETERS CALCULATION OF EXTRACTOR SYSTEM FOR 13 MeV PET CYCLOTRON. The calculation of physical parameters of extractor system for 13 MeV PET Cyclotron has been done. The extractor position is 40.4 cm from cyclotron centre for average magnetic field of 1.275 T. The dees voltage and angle are 40 kV, and 40° respectively, energy gain for each turn is 159 keV, number of turns is 81 and the distance between each turn is 5 mm. This distance is important parameter for determining the width of extractor foil. The calculation result of foil deposition energy shows that for proton beam current of 20 μA and its beam cross section of 0.9 cm^2 , the foil life time around 56 second is achieved.

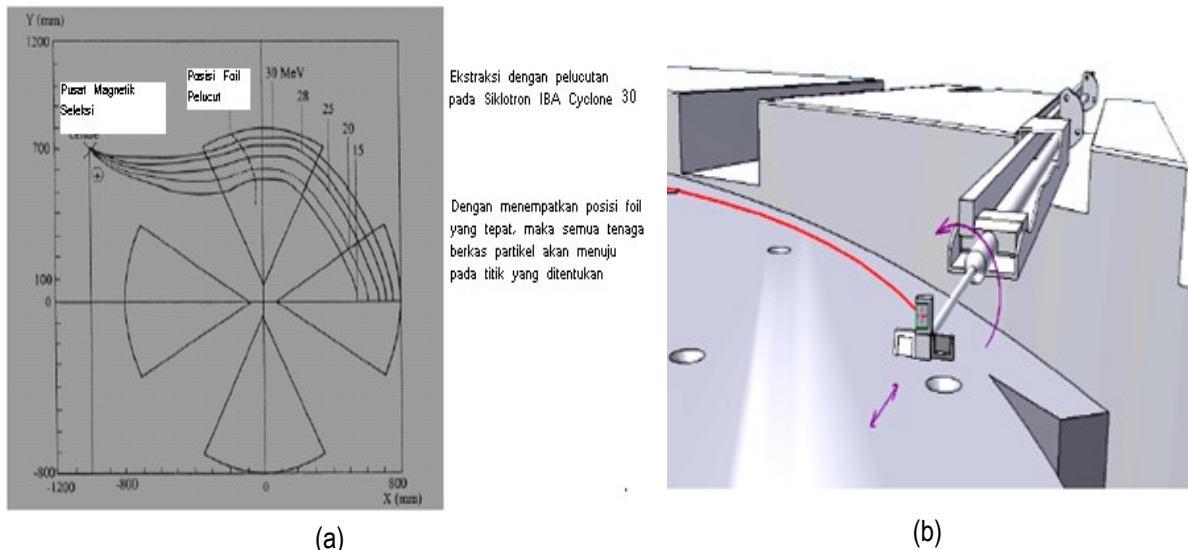
Keywords : Cyclotron, proton, extraction, stripper, carbon foil

PENDAHULUAN

Siklotron adalah pemercepat partikel bermuatan dengan arah gerak berkas partikel melingkar, dari gerak melingkar berjari-jari kecil sampai pada jari-jari lintasan yang semakin besar. Semakin besar jari-jari lintasannya semakin besar pula energi berkas partikel tersebut. Gerak berkas partikel dengan lintasan melingkar karena adanya percepatan oleh tegangan RF yang kemudian dibelokkan oleh medan magnet yang tegak lurus terhadap gerak lintasan berkas partikel tersebut. Sistem ekstraktor adalah salah satu sistem pada siklotron yang berfungsi mengendalikan berkas berenergi tertentu untuk diarahkan menuju ke target. Ada dua sistem ekstraktor siklotron yaitu sistem deflektor elektrostatik, dan sistem *stripper*. Untuk siklotron proton yang memercepat ion hidrogen negatif, maka sistem ekstraktornya menggunakan foil karbon. Foil karbon ini mampu mengubah ion hidrogen bermuatan negatif menjadi ion hidrogen bermuatan positif (proton). Untuk mengarahkan proton tidak diperlukan sistem elektrostatik lagi, tetapi memanfaatkan medan magnet yang ada, namun arah lintasan berlawanan arah dengan ion hidrogen negatif. Gambar 1 (a) dan (b) memperlihatkan lintasan berkas partikel pada sistem siklotron dengan 4 sektor magnet dan ekstraktor foil karbon.

Saat ini siklotron berenergi dari 9 sampai dengan 13 MeV digunakan untuk diagnosis penyakit seperti kanker dan pengembangan selanjutnya dengan peningkatan energi sampai orde ratusan MeV digunakan untuk terapi. Untuk siklotron energi tinggi, dengan teknologi konvensional membutuhkan ukuran yang besar maka dengan meningkatkan medan magnet dengan bahan superkonduktor, ukuran siklotron dapat diperkecil. PTAPB

sebagai pusat yang menekuni dalam rancang bangun akselerator di BATAN, menyusun program 2010 sampai dengan 2014 diarahkan pada rancang bangun siklotron 13 MeV untuk PET, dan tahun kedua ini difokuskan pada rancangan detil siklotron 13 MEV untuk PET, termasuk di dalamnya rancangan detil sistem ekstraktor yang pada makalah ini dilakukan perhitungan parameter rancangannya ⁽²⁾.



Gambar 1. Siklotron IBA Cyclone 30 dengan 4 sektor magnetik dan foil pelucut (*Stripper foil*) yang mampu mengambil berkas partikel dengan berbagai energi (a) dan sistem pelucut yang dapat bergerak ke arah radial dan berputar (b) ⁽¹⁾.

DASAR TEORI

Parameter ekstraktor siklotron meliputi posisi, ukuran yang meliputi lebar, panjang dan tebal, kemudian efisiensi dan umurnya. Untuk menentukan posisi ekstraktor, beberapa spesifikasi yang dibutuhkan adalah tenaga proton, besarnya medan magnet rata-rata, dan tenaga massa diam proton. Faktor γ dan β diperoleh menurut persamaan (1), (2) dan (3) ⁽³⁾

$$\gamma = 1 + \frac{E_p}{m_0 c^2} \quad (1)$$

dan faktor β menurut persamaan (2)

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (2)$$

atau faktor $\beta\gamma$

$$\beta\gamma = \frac{v}{c} \gamma \quad (3)$$

$m_0 c^2$ adalah tenaga diam proton, m_0 adalah massa diam proton, besarnya $m_0 c^2 = 938$ MeV, c adalah kecepatan cahaya yang besarnya $2.998 \cdot 10^8$ m/det, E_p adalah energi kinetik proton.

Rigiditas magnetik BR dirumuskan menurut persamaan (4)

$$BR = \frac{q}{R} \quad (4)$$

q adalah muatan elektron yang besarnya $1.6 \cdot 10^{-19}$ C, B adalah medan magnet dan R adalah jari-jari ekstraktor.

Perhitungan Tampang Lintang Reaksi

Untuk menentukan hubungan antara kerapatan ion hidrogen negatif, atom hidrogen dan proton diperlukan rumusan tampang lintang reaksi antara foil karbon dengan ion hidrogen negatif ⁽⁴⁾.

Tampang lintang total pelucutan elektron dari ion hidrogen negatif menjadi atom hidrogen (hidrogen neutral) dan proton (ion hidrogen bermuatan positif) dinyatakan melalui persamaan :

(5)

dimana $\sigma_{-1,0}$ adalah tampang lintang dari H^- ke H^0 , $\sigma_{-1,1}$ dari H^- ke H^+ , n adalah keadaan terakhir dari H^- , m adalah keadaan terakhir dari atom target, a_0 adalah jari-jari atom Bohr, dan α adalah tetapan struktur halus, β adalah faktor relativistik, I_{nm} , J_{nm} dan K_{nm} adalah integral. Secara sederhana tampang lintang reaksi sebanding dengan β^2 . Tabel 1 menunjukkan tampang lintang pada energi 200 MeV dan 800 MeV.

Tabel 1. Tampang lintang pelucutan H^- (10^{-18} cm^2)

	E = 800 MeV	E = 200 MeV
$\sigma_{-1,0}$	$0,676 \pm 0,009$	$1,56 \pm 0,14$
$\sigma_{0,1}$	$0,264 \pm 0,005$	$0,60 \pm 0,10$
$\sigma_{-1,1}$	$0,012 \pm 0,006$	$-0,08 \pm 0,13$

Dengan Tabel 1 dapat dihitung tampang lintang untuk energi-energi lain.

Perhitungan Fraksi H^- , H^0 , dan H^+

Kerapatan fraksi-fraksi dirumuskan menurut persamaan (6), (7), (8) ⁽⁵⁾

(6)

(7)

(8)

dimana x adalah tebal foil (dalam satuan jumlah atom target/cm²), dan N_{H^-} , N_{H^0} dan N_{H^+} adalah fraksi berkas.

Tebal dan umur foil dapat ditentukan berdasar persamaan (9) dan (10) ⁽⁶⁾

Rumusan tebal foil

(9)

Rumusan umur foil

(10)

Untuk menentukan jumlah putaran, dan jarak antar setiap putaran serta perolehan energi setiap putaran dapat diperoleh melalui persamaan (11) ⁽⁷⁾

(11)

ΔH adalah perolehan energi setiap putaran, q muatan, V_{dee} adalah tegangan dee h jumlah harmonik, θ_{dee} adalah sudut dee

Untuk memperoleh energi deposisi pada foil karbon diperlukan koefisien daya henti (*stopping power*) hidrogen pada karbon, daya henti elektron pada karbon, jumlah partikel yang menumbuk yang berkaitan dengan arus dan koefisien panas jenis karbon. Koefisien daya henti hidrogen adalah 1.847 (MeV/(gram.cm²)) dan untuk elektron adalah 1.71 MeV/(gram.cm²). Koefisien panas jenis foil karbon adalah 0.165 cal/(gram-K) atau 0.6908 J/(gram-K) ⁽⁸⁾.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagram alir perhitungan parameter fisis ekstraktor selengkapanya disajikan pada LAMPIRAN.

Penentuan Posisi/Jari-Jari Ekstraktor

Posisi ekstraktor diperoleh dengan menggunakan persamaan (1) sampai dengan (4). Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan untuk berbagai parameter seperti γ , β , $\beta\gamma$, Rigiditas magnetik RB , Jari-jari

ekstraktor R dan medan listrik deflektor (untuk ekstraktor yang tidak menggunakan *stripper*) sebagai fungsi energi untuk medan magnet $B = 1.275$ T.

Tabel 2. Hasil perhitungan parameter γ , β , $\beta\gamma$, RB , E deflektor untuk medan magnet $B = 1.275$ T

Energi Partikel (MeV)	γ	β	$\beta\gamma$	$qB_{ext}R_{ext}$	$B_{ext}R_{ext}$	$R_{ext}(m)$	$E_{defleksi} (V/m)$
50	1.053304904	0.314091511	0.330834129	310.322413	1.034408043	0.770242712	831979.6153
30	1.031982942	0.247028305	0.254928997	239.1233991	0.797077997	0.605784444	804219.1752
15	1.015991471	0.176725205	0.179551301	168.4191201	0.561397067	0.433381025	780628.2503
13	1.013859275	0.164781002	0.167064747	156.7067325	0.522355775	0.404090404	776908.0994
11	1.011727079	0.151815488	0.15359584	144.0728982	0.480242994	0.372295236	772869.7684
10	1.010660981	0.144864678	0.146409078	137.3317152	0.457772384	0.355249852	770683.4725
9	1.009594883	0.137539345	0.138859019	130.2497601	0.434165867	0.337286029	768346.0193
6	1.006396588	0.112567609	0.113287657	106.2638226	0.354212742	0.276048149	759848.9528
2	1.002132196	0.0651981	0.065337115	61.28621378	0.204287379	0.15988449	736325.6454
1	1.001066098	0.046138826	0.046188015	43.32435804	0.144414527	0.113145671	717699.9352

Tabel 2, menunjukkan bahwa semakin besar energi yang dikehendaki akan semakin besar pula jari-jari ekstraktornya. Maka salah satu cara untuk mengurangi jari-jari siklotron dengan memperbesar medan magnetnya, namun untuk memperbesar medan magnet terkendala oleh kejenuhan dari bahan magnet, oleh karena itu salah satu upaya adalah dengan menggunakan bahan superkonduktor, disamping mampu mengalirkan arus besar medan magnet yang dihasilkan juga besar, sehingga ukuran siklotron dengan magnet superkonduktor akan semakin kecil. Untuk energi siklotron 13 MeV, posisi atau jari-jari ekstraktor sebesar 40.4 cm. Sedangkan bila tidak menggunakan *stripper*, medan listrik yang dibutuhkan untuk menyimpangkan arah berkas partikel menuju ke target sebesar 7,77 kV/cm.

Penentuan Tampang Lintang Pelucutan

Tampang lintang pelucutan

Tampang lintang pelucutan untuk berbagai energi siklotron dapat dihitung dengan mendasarkan persamaan (5) dan interpolasi data Tabel 1. Tabel 3 memperlihatkan hasil perhitungan tampang lintang pelucutan untuk berbagai energi.

Dengan mengabaikan faktor integral pada persamaan (5), maka interpolasi data dari Tabel 1, besarnya tampang lintang pelucutan untuk energi semakin rendah menunjukkan nilai tampang lintang pelucutan yang semakin tinggi. Untuk energi 13 MeV, maka nilai berturut-turut sebesar 17.59319891, 6.848359306, 0.306995417.

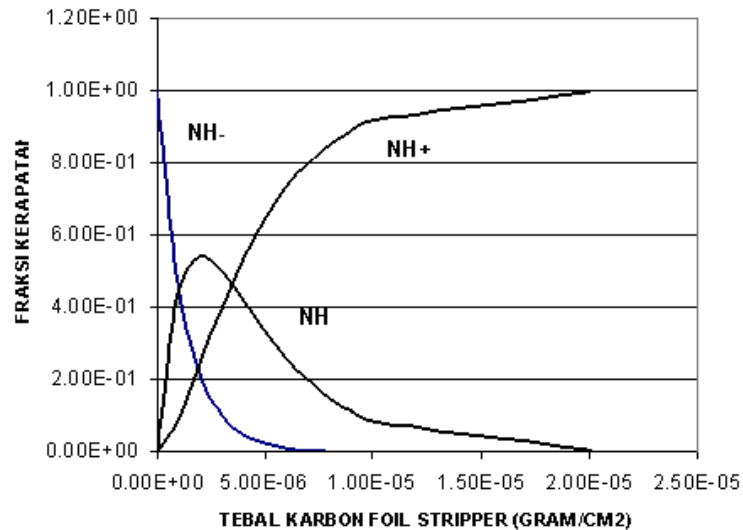
Tabel 3. Parameter γ , $\beta\gamma$, dan tampang lintang pelucutan

T (MeV)	γ	$\beta\gamma$	$\sigma_{-1,0}$ $\times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$\sigma_{0,1}$ $\times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$\sigma_{-1,1}$ $\times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1}$ $\times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$\sigma_{-1,0} / (\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1})$
800	1.852878465	0.8418569	0.676	0.264	0.012	0.688	1.594339623
200	1.213219616	0.566221571	1.49	0.58	0.026	1.516	1.591880342
50	1.053304904	0.314091511	4.84224424	1.884900442	0.084495537	4.926739777	1.591880342
30	1.031982942	0.247028305	7.828267413	3.047245033	0.136600639	7.964868053	1.591880342
15	1.015991471	0.176725205	15.2954445	5.953931416	0.266900374	15.56234487	1.591880342
13	1.013859275	0.164781002	17.59319891	6.848359306	0.306995417	17.90019432	1.591880342
11	1.011727079	0.151815488	20.72654572	8.068051353	0.361671268	21.08821698	1.591880342
10	1.010660981	0.144864678	22.7632399	8.860858485	0.397210898	23.1604508	1.591880342
9	1.009594883	0.137539345	25.25254671	9.829850399	0.440648466	25.69319518	1.591880342
6	1.006396588	0.112567609	37.69920642	14.67485887	0.657838501	38.35704492	1.591880342
2	1.002132196	0.0651981	112.3800479	43.74525353	1.960994124	114.341042	1.591880342
1	1.001066098	0.046138826	224.4016268	87.35096883	3.915733085	228.3173599	1.591880342

Penentuan Fraksi

Kerapatan N_{H^-} , N_{H^0} dan N_{H^+}

**KURVA FRAKSI KERAPATAN ION HIDROGEN NEGATIF (N_{H^-}),
NETRAL (N_{H^0}), DAN ION HIDROGEN POSITIF (N_{H^+}) SEBAGAI FUNGSI
TEBAL KARBON FOIL STRIPPER**



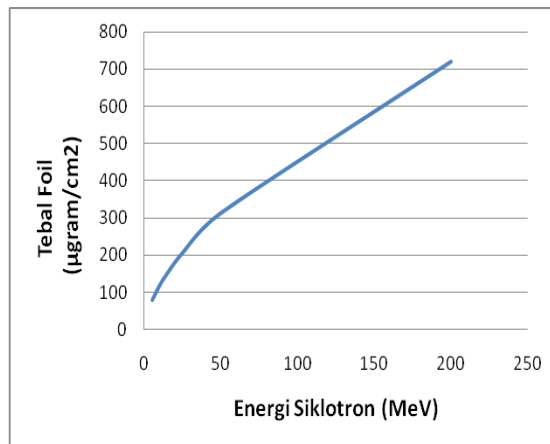
Gambar 2. Fraksi kerapatan N_{H^-} , N_{H^0} dan N_{H^+} sebagai fungsi tebal foil pelucut (*stripper*)

Kerapatan fraksi N_{H^-} , N_{H^0} dan N_{H^+} , untuk siklotron berenergi 13 MeV dapat dihitung dari persamaan (6), (7) dan (8). Gambar 1 memperlihatkan fraksi kerapatan N_{H^-} , N_{H^0} dan N_{H^+} , sebagai fungsi ketebalan foil.

Dari kurva Gambar 2, tampak bahwa pada siklotron 13 MeV, interaksi hidrogen negatif dengan foil pelucut menunjukkan kerapatan hidrogen negatif N_{H^-} akan menurun terus seiring dengan kenaikan tebal foil, sedangkan fraksi N_{H^0} akan mulai naik, dan kemudian pada ketebalan tertentu (pada gambar dengan ketebalan sekitar $2 \mu\text{gram/cm}^2$) mencapai harga tertentu, kemudian menurun terus, dan fraksi N_{H^+} terus naik dan pada ketebalan tertentu (sekitar $7 \mu\text{gram/cm}^2$) mulai naik dengan sangat perlahan sampai mendekati jenuh.

Penentuan Tebal Foil

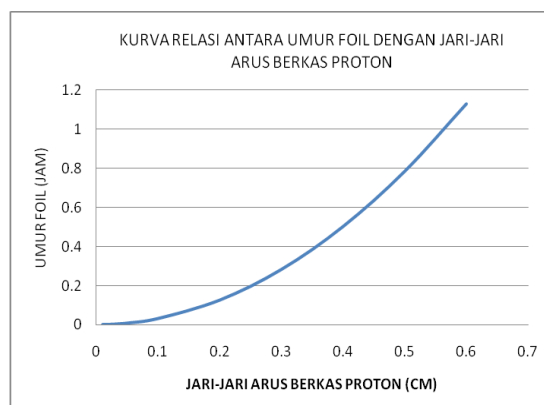
Dengan persamaan (9) dapat diketahui tebal foil sebagai fungsi tenaga partikel hidrogen. Gambar 3 menunjukkan tebal foil sebagai fungsi tenaga siklotron. Untuk energi siklotron sebesar 13 MeV, maka tebal foil yang diperlukan adalah 139,8 $\mu\text{gram}/\text{cm}^2$



Gambar 3. Tebal foil sebagai fungsi energi siklotron

Penentuan Umur Foil

Dengan persamaan (10) dapat diketahui umur foil sebagai fungsi jari-jari berkas untuk arus berkas 70 μA dan energi siklotron 13 MeV, seperti ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Umur foil sebagai fungsi jari-jari berkas untuk arus berkas 70 μA dan energi siklotron 13 MeV

Semakin lebar ukuran berkas hidrogen, juga semakin kecil beban yang diterima foil, sehingga semakin besar umur foil ekstraktornya, semakin besar arusnya juga semakin pendek umur foilnya.

Perhitungan Perolehan Energi Tiap Putaran, Jumlah Putaran, dan Jarak Antar Putaran

Dengan persamaan (11), Tabel 4 memperlihatkan hasil perhitungan perolehan energi setiap putaran ΔE , jumlah putaran, dan jarak antara setiap putaran pada berbagai tegangan dee V_{dee} dan sudut dee θ_{dee} untuk energi siklotron 13 MeV.

Tabel 4. Hasil perhitungan ΔE , jumlah putaran, dan jarak antar putaran

V_{dee} (kV)	Muatan	Jumlah	θ_{dee}	ΔE (keV)	Jumlah Putaran	Jarak Antar
----------------	--------	--------	----------------	------------------	----------------	-------------

	Hidrogen (q)	harmonik (h)				Lintasan (cm)
50	-1	4	43	184.6916894	70.38757424	0.582489174
45	-1	4	43	166.2225205	78.20841583	0.524240257
40	-1	4	43	147.7533515	87.98446781	0.465991339
50	-1	4	40	198.7777308	65.39968008	0.626914382
45	-1	4	40	178.8999577	72.6663112	0.564222944
40	-1	4	40	159.0221846	81.7496001	0.501531505

Dari Tabel 4 tampak bahwa untuk memperoleh perolehan energi, jumlah putaran dan jarak antar putaran semakin besar dapat diperoleh dengan menaikkan tegangan dee, namun tidak demikian untuk pemilihan sudut dee, karena sudut dee dibatasi nilai sinus. Pada tabel 4, maka dengan tegangan dee 50 kV dan sudut dee 40, maka diperoleh nilai parameter-2 yaitu $\Delta E = 198$ keV, jumlah putaran 65, dan jarak antar putaran 6.2 mm. Kendala utama yang dihadapi dalam penggunaan tegangan dee tinggi seperti 50 atau 45 kV adalah adanya lucutan hubung pendek dalam siklotron yang justru akan merusak arus berkas, oleh karena itu seringkali dihindari penggunaan tegangan dee yang tinggi. Karena kendala tersebut untuk perancangan siklotron 13 MeV di PTAPB telah dipilih tegangan dee 40 kV. Parameter jarak antar putaran, sangat mempengaruhi pemilihan lebar foil ekstraktor. Dengan demikian tentunya lebar foil ekstraktor lebih kecil daripada jarak antara lintasan, oleh karena itu bila diambil separonya saja, maka lebar ekstraktor yang menjorok ke dalam selebar 3 mm dan ke arah luar sekitar 3 mm, jadi lebar total ekstraktor sekitar 6mm. Seperti diketahui bahwa lebar arus berkas juga ditentukan selain oleh penyimpangan awal dari saat keluarnya hidrogen negatif dari sumber ion juga ditentukan oleh osilasi betatron. Seperti diketahui bahwa osilasi betatron dapat ke arah transversal juga ke arah aksial, namun nilai amplitudo osilasi betatron baik ke arah tegak maupun ke arah aksial sangat sulit diperhitungkan.

Penentuan Panas Terdeposisi pada Foil Ekstraktor

Deposisi panas pada foil ekstraktor ditentukan oleh daya henti hidrogen dan elektron pada foil dan arus berkas serta ukuran berkas arus. Untuk daya henti hidrogen sebesar $1,85 \text{ MeV}/(\text{gramcm}^2)$, atau $1,85 \text{ eV}/(\mu\text{gram}/\text{cm}^2)$, massa jenis karbon foil ekstraktor $3.5 \text{ gram}/\text{cm}^3$, kapasitas panas foil $0,6908 \text{ J}/(\text{gramK})$. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan energi deposisi hidrogen dalam foil dan kenaikan suhu setiap detik sebagai fungsi arus berkas.

Dari Tabel 5 tampak bahwa ada kenaikan suhu yang signifikan untuk setiap detik tumbukan hidrogen negatif dengan foil ekstraktor, misalkan untuk arus $20 \mu\text{A}$, setiap detiknya ada kenaikan suhu sekitar 66 K, maka bila titik leleh foil sekitar 3700 K, umur foil hanya sekitar 56 detik lebih kecil dari 1 menit. Padahal umur foil akan semakin pendek untuk arus berkas yang semakin besar. Bila perhitungan di atas dianggap benar, maka untuk memperpanjang umur foil, seyogyanya arus yang diberikan dalam bentuk pulsa. Padahal dari Gambar 4, tampaknya umur foil dengan luas ekstraktor yang sama besarnya dalam orde jam, oleh karena itu masih diperlukan data acuan sehingga diperoleh data perhitungan yang lebih tepat.

Tabel 5. Energi deposisi dan kenaikan suhu foil setiap detik untuk arus 20, 50, 70 μA

Arus (A)	Luas Ekstraktor (cm^2)	Rapat Arus (A/cm^2)	Rapat Partikel ($/\text{cm}^2$)	Tebal Foil (cm)	Energi Deposisi Hidrogen (J/cm^2)	Massa Foil (gram)	ΔT (K)
2.00×10^{-05}	9.00×10^{-01}	2.22×10^{-05}	$1.39 \times 10^{+14}$	4.00×10^{-05}	5.76×10^{-03}	1.26×10^{-04}	$6.61 \times 10^{+01}$
5.00×10^{-05}	9.00×10^{-01}	5.56×10^{-05}	$3.47 \times 10^{+14}$	4.00×10^{-05}	1.44×10^{-02}	1.26×10^{-04}	$1.65 \times 10^{+02}$
7.00×10^{-05}	9.00×10^{-01}	7.78×10^{-05}	$4.86 \times 10^{+14}$	4.00×10^{-05}	2.01×10^{-02}	1.26×10^{-04}	$2.31 \times 10^{+02}$

KESIMPULAN

Telah dilakukan serangkaian perhitungan untuk menentukan posisi, dan ukuran karbon foil ekstraktor pada perancangan sistem ekstraktor siklotron 13 MeV. Posisi ekstraktor untuk siklotron 13 MeV dengan medan magnet rata-rata 1.275 T, berada pada jari-jari sekitar 40,4 cm dari titik pusat siklotron. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa untuk tegangan dee yang besar dengan sudut dee yang tepat memberikan keuntungan jumlah putaran menjadi lebih sedikit sehingga diperoleh jarak antar putaran cukup besar, sebagai contoh untuk tegangan dee 50 kV dan sudut dee 40, maka diperoleh jumlah putaran sekitar 65 dan jarak antar putaran sekitar 6.2 mm. Sedangkan untuk tegangan dee yang lebih rendah akan memberikan jumlah putaran yang lebih banyak sehingga jarak antar putaran menjadi kecil. Dengan diperoleh jarak antar putaran lebih besar akan lebih lebar pula ukuran foil untuk menampung arus berkas hidrogen. Seperti diketahui bahwa pelebaran arus berkas hidrogen disebabkan adanya pelebaran awal saat berkas hidrogen keluar dari sumber ion dan penyimpanan karena adanya osilasi betatron. Belum diketahuinya rumusan amplitudo osilasi betatron, maka belum diperoleh ukuran ekstraktor ke arah tegak maupun ke arah aksialnya. Namun demikian, dengan pemilihan tegangan dee yang besar (misalkan 50 kV), terkendala dengan adanya *breakdown* dalam bejana siklotron, yang berakibat kerugian arus berkas, oleh karena itu telah dipilih tegangan dee 40 kV sehingga diperoleh jumlah putaran sekitar 81 dan jarak antar putaran sekitar 5 mm. Penentuan umur foil juga belum ada kesesuaian, dengan memakai rumusan yang ada maka dengan kondisi yang sama, umur foil yang diperoleh dalam orde jam, namun dengan perhitungan menggunakan daya henti hidrogen pada bahan karbon dan maka umur foil yang diperoleh hanya sekitar 56 detik, oleh karena itu perlu dilakukan penelitian yang lebih seksama agar ada kesesuaian antara metode-metode perhitungan yang ada.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Ir. Suprpto dan Bapak Ir. Slamet Santosa M.Sc yang telah memberikan tugas penelitian dengan topik penelitian rancangan detail sistem ekstraktor, kepada segenap tim rancang bangun siklotron 13 MeV, yang selalu saling memberikan masukan dalam diskusi mingguan, dan kepada KPTF serta tim redaksi GANENDRA yang memeriksa makalah ini agar makalah lebih bermutu. Penelitian ini dibawah koordinasi sub-kegiatan Perancangan Siklotron Hidrogen 13 MeV untuk Produksi Radioisotop (MAK: 220302)

DAFTAR PUSTAKA

1. P. HEIKKINEN, Extraction From Cyclotron, in pdf file,downloaded from www.kvi.nl/~agorcalc/ECPM2009/EducationalSession/3_Heikkinen.pdf, (2009)
2. SLAMET SANTOSA, "Perancangan Siklotron Hidrogen 13 MeV untuk Produksi Radioisotop", Sub-Uskeg tahun (2010)
3. TIMOTHY PONTER, Rutgers 12 Inch Cyclotron, "Designing dan Testing of a Beam Extractor", in pdf file, downloaded from www.physics.rutgers.edu/cyclotron/papers/TPDeflector.pdf, (2009)
4. W. CHOU ET AL, "Some Physics Issues of Carbon Stripping Foils", in Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA.
5. Y.C. CHAE and Y.L. Cho, "Study of Field Ionization in the Charge Exchange Injection for IPNS Upgrade", in pdf file, downloaded from accelconf.web.cern.ch/accelconf/p95/CONTENTS.PDF, Proccs. of the (1995) Particle Accelerator Conference Vol. 1
6. G.G. GULBEKYAN et al., "Extraction By Stripping of Heavy Ion Beams from AVF Cyclotrons", Presented in Cyclotrons and Their Applications (2007), Eighteenth International Conference, Dubna, Russia (2007)
7. M. YOON, et al., Initial Design of a 13 MeV Cyclotron For Positron Emission Tomography, in pdf file, downloaded from, accelconf.web.cern.ch/accelconf/a98/APAC98/6D051.PDF, (1998)
8. W. CHOUA, et al., "Stripping Efficiency and Lifetime of Carbon Foils", in pdf file, downloaded from <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0611/0611157.pdf>, (2006)

LAMPIRAN

Diagram Alir Perhitungan Parameter Fisis Sistem Ekstraktor

