

SIMULASI TRANSPOR BERKAS ION DALAM AKSELERATOR SAMES J 2.5

Sigit Hariyanto

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju - BATAN

ABSTRAK

SIMULASI TRANSPOR BERKAS ION DALAM AKSELERATOR SAMES J 2.5. Telah dilakukan simulasi transpor berkas ion dalam akselerator SAMES j. 2.5 dengan program partikel berkas optik laboratory versi 1.1.1. Berkas ion untuk eksperimen APNC digunakan ion deuterium, keluar dari pemercepat tenaga 150 keV, amplop berkas dengan ruji ke arah horisontal $X = 1,923$ cm, sudut kemiringan $X' = 0,471$ mRad dan ruji ke arah vertikal $Y = 1,973$ cm, sudut kemiringan $Y' = 0,4538$ mRad. Keluaran berkas dari tabung pemercepat dilewatkan pada pemokus kuadrapol listrik, pemandu berkas dan ke target. Pembatas peledaran berkas dipasang program "fitting" pada ujung pemandu dan target dengan ruji ke arah X,Y adalah 15mm dan 12mm Hasil simulasi program menunjukkan bahwa amplop berkas ke arah X, Y pada ujung pemandu adalah 13,16 mm dan 17mm, sedangkan pada target ruji berkas ke arah X, Y adalah 11,6 mm dan 13,4 mm. Koefisien kuadrapol listrik diperoleh 59,089 dan -74,6785 atau kalau dihitung tegangan listrik yang harus diberikan 2,77kV dan -3,5 kV. Untuk eksperimen PIXE keluaran berkas ion hydrogen dari tabung pemercepat dilewatkan pada kuadrapol listrik, pembelok magnet, kuadrapol magnet dan ke target. "Fitting" amplop berkas sebelum kuadrapol dengan ruji ke arah X dan Y 10mm dan pada target 1,5mm. Hasil perhitungan program diperoleh koefisien kuadrapol listrik 69,3056 dan -73,7274 atau pada tegangan 6,49 kV dan -6,22kV. Sedangkan besarnya medan magnet pada kuadrapol magnet adalah 0,51kG. dan -0,57 kG.

ABSTRACT

SIMULATION OF ION BEAM TRANSPORT IN SAMES J 2.5 ACCELERATOR. Simulation of ion beam transport in J.2.5 accelerator using particle beam optics laboratory program version 1.1.1. has been carried out. The ion beam of APNC experiment were deuterium ion, output energy accelerator of 150keV, radius of beam envelope in horizontally $X = 1.923$ cm, beam divergence of $X' = 0.471$ mRad and radius of beam envelope in vertically $Y = 1.973$ cm, beam divergence of $Y' = 0.454$ mRad. The beam output of accelerator tube passing through a electrostatic quadrupole, beam guide and the target. The beam spread limited is entered "fitting" program and the target at the end beam guide and the target with radius in X, Y direction of 15 mm and 12 mm. The result of simulation program has shown that beam envelope in X, Y direction at the end beam guide are 13,6 mm and 17 mm, beam radius of the target in X, Y direction are 11.6 mm and 13.4 mm. Electrostatic quadrupole coefficient are 59.089 and -74.678, if electric voltage calculation must be delivered 2.77 kV and -3.5 kV. The hydrogen ion beam for PIXE experiment of accelerator tube passing trough in electrostatic quadrupole, bending magnet, magnetic quadrupole and target. The "fitting" program before magnetic quadrupole and target with radius of beam in X,Y direction are 10mm and 1,5 mm. The result of calculation program has shown that quadrupole coefficient are 69.3056 and -73.7274, the electric voltage are 6.49 kV and - 6.22 kV. The magnitude magnetic field of magnetic quadrupole are 0.51 kG and - 0, 57 kG.

PENDAHULUAN

Dalam perencanaan pengembangan akselerator Sames J 2.5 atau generator neutron di P3TM-Batan diharapkan selain dimanfaatkan untuk analisa pengaktipan neutron cepat (APNC), dapat juga dimanfaatkan untuk eksperimen yang

lain yaitu PIXE energi rendah. Hal ini memerlukan sistem transpor berkas dari sumber ion melewati pemercepat dan terus ke tempat dimana eksperimen mau dilaksanakan. Untuk eksperimen APNC dilakukan dengan memanfaatkan peralatan/komponen yang sudah ada serta memperpanjang tabung hanyut (*drift tube*)

dan menggeser penempatan kedudukan tritium target. Sedangkan pada eksperimen PIXE, keluaran berkas ion dari pemercepat dibelokkan lebih dulu untuk diarahkan ke target. Untuk itu diperlukan perencanaan penempatan berbagai peralatan transpor berkas seperti pembelok (*bending magnet*) atau deflektor, pemokus (kuadrapol magnet atau elektrostatis), tabung hanyut, pemantau profil berkas, pemantau arus berkas serta tambahan sistem hampa. Perencanaan pengembangan eksperimen PIXE memerlukan perhitungan simulasi keadaan/kualitas berkas sepanjang perjalanan berkas ion, sehingga dapat mencapai target di tempat eksperimen pada keadaan dan kualitas yang diinginkan. Simulasi ini akan dicoba dilakukan dengan program transport PBO (*Particle Beam Optics*) yang memang sudah dikembangkan untuk tujuan transpor berkas.⁽¹⁾

Dalam makalah ini dilaporkan hasil simulasi yang telah dilakukan untuk berkas deuterium, yang dipercepat dengan tegangan 150kV. Dari sumber ion RF. Untuk simulasi ini digunakan model tataletak akselerator J 2.5 buatan SAMES dan menyesuaikan pemandu berkas yang melewati pembelok magnet dengan dimensi lebih kecil dari jarak kutup magnetnya (Gambar 1). Amplop berkas ion yang melewati peralatan akselerator dijaga tidak menumbuk dinding-dindingnya dan diameter berkas yang mengenai target dapat diperoleh sesuai dengan yang diinginkan. Simulasi untuk perancangan PIXE diperlukan tambahan peralatan yaitu pembelok maknet, pemokus kuadrapol magnet yang telah dan sedang dipersiapkan di P3TM.

DASAR TEORI

Suatu berkas partikel yang bergerak dalam garis tranpoortasi berkas melalui sistem statis maupun sistem medan magnet maupun elektrostatis dapat disederhanakan dengan proses perkalian matriks.

$$X(1) = R X(0) \quad (1)$$

Subskrip 0 dan 1 menunjukkan masuk dan keluarnya berkas ke masing-masing peralatan atau komponen sistem akselerator. R adalah matriks pengiriman (matrix R) dengan elemen 6x6 untuk orde pertama, merupakan persamaan gerak partikel yang melalui peralatan atau komponen akselerator. Beberapa komponen akselerator yang digunakan untuk eksperimen antara lain : tabung hanyut, lensa lensa pemokus, pembelok magnet, kuadrapol magnet dan sebagainya. Secara umum matriks R untuk semua komponen akselerator merupakan perkalian masing-masing matriks⁽²⁾;

$$R_{\text{total}} = R(n) \dots R(3) R(2) R(1) \quad (2)$$

Berkas partikel dalam garis perjalanan kalau diproyeksikan ke bidang horisontal maupun vertical berbentuk elips dengan arah yang berbeda. *Teorema Liouville* sangat berguna untuk menggambarkan berkas dalam ruang fase. Bila kita tahu luas yang diduduki oleh partikel-partikel dalam ruang fase pada awal dari garis peralanan berkas, maka kita dapat menentukan lokasi dan distribusi berkas pada tiap tempat yang lain sepanjang garis perjalanan, tanpa harus menghitung trayektory dari masing-masing partikel. Elips yang membatasi semua partikel dari berkas dalam ruang fase disebut elips fase.

Persamaan elips dalam dimensi n dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut^(2,3) :

$$X(0)^T \sigma(0)^{-1} X(0) = 1 \quad (3)$$

Dengan $X(0)^T$ adalah tranpose dari koordinat vector matriks kolom berkas $X(0)$ dan $\sigma(0)$ matriks simetri merupakan bilangan nyata positif, kalau dituliskan dalam 2 dimensi (x, x') arah horizontal matriks σ :

$$\sigma_{22} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} \text{ inversnya } \sigma^{-1} = 1/\varepsilon_x^2 \begin{bmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{21} \\ -\sigma_{21} & \sigma_{11} \end{bmatrix}$$

dengan $\varepsilon_x^2 = \text{determinan } \sigma$

matriks kolom berkas :

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} \text{ dan } X^{-T} = (x \ x')$$

Penjabaran persamaan matriks $X^T \sigma^{-1} X = 1$ adalah bentuk persamaan elips :

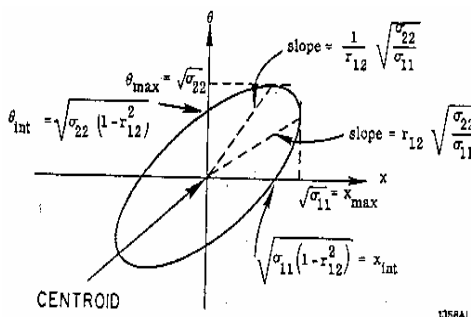
$$\sigma_{22} X^2 - 2 \sigma_{21} X' + \sigma_{11} X'^2 = \varepsilon_x^2$$

$$= \det \sigma \quad (4)$$

Luas elips adalah :

$$A = \pi \varepsilon_x = \pi (\det \sigma)^{1/2} = \pi X_{\text{mak}} X'_{\text{int}} = \pi X_{\text{int}} X'_{\text{mak}}, \quad \varepsilon_x = \text{emitansi}$$

Elips fase pada bidang (X, X') ditunjukkan pada Gambar 1 dengan masing-masing elemen matriks σ .



Gambar Elips fase pada bidang (X, X')
Orientasi dari elips adalah korelasi antara X dan X' , yang besarnya tergantung σ_{ii}

$$r_{12} = r_{21} = \frac{\sigma_{21}}{\sqrt{(\sigma_{11} \sigma_{22})}}$$

berkas partikel setelah melalui sistem komponen akselerator, transformasi berkas matriksnya ditunjukkan pada persamaan 1 yaitu $X(1) = R X(0)$. Kombinasi matriks tersebut dengan persamaan berkas matriks elips, dan dengan menggunakan matriks satuan $R R^{-1} = I$, diperoleh :

$$X(0)^T = \frac{(R^T R^{T-1})}{I} \sigma(0)^{-1} \frac{(R^T R^{T-1})}{I} X(0) = 1$$

atau

$$[R X(0)]^T [R \sigma(0) R^T]^{-1} [R X(0)] = 1$$

Diperoleh elips baru setelah transformasi menjadi :

$$X(1)^T \sigma(1)^{-1} X(1) = 1 \quad (5)$$

Dengan : $\sigma(1) = R \sigma(0) R^T$

Persamaan diatas merupakan matriks sigma pada ujung garis transport berkas dihubungkan dengan awal bidang berkas.

Arti fisis element matriks $\sqrt{\sigma_{ii}}$ sebagai berikut :

$$\sqrt{\sigma_{11}} = X_{\text{mak}} = \text{setengah lebar maksimum amplop berkas pada bidang } X$$

$$\sqrt{\sigma_{22}} = X' = \text{setengah sudut divergensi amplop berkas pada bidang } X$$

$$\sqrt{\sigma_{33}} = Y_{\text{mak}} = \text{setengah tinggi maksimum amplop berkas pada bidang } Y$$

$$\sqrt{\sigma_{44}} = Y' = \text{setengah sudut divergensi amplop berkas pada bidang } Y$$

$$\sqrt{\sigma_{55}} = 1 = \text{penyebaran arah longitudinal berkas}$$

$$\sqrt{\sigma_{66}} = \delta = \Delta p/p = \text{pergeseran momentum yang ditransmisikan sistem}$$

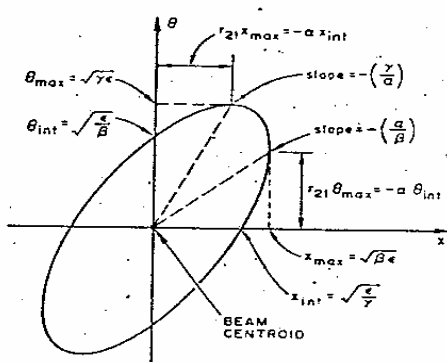
Berkas partikel di dalam transport berkas proyeksinya merupakan bentuk elips, dapat juga dituliskan dalam bentuk parameter Twiss α, β, γ

$$\gamma_x x^2 + 2 \alpha_x x x' + \beta_x x'^2 = \varepsilon_x \quad (6)$$

masing masing elemen pada persamaan elips diatas dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sigma dengan,

$$\gamma_x = \sigma_{22}/\varepsilon_x, \quad \beta_x = \sigma_{11}/\varepsilon_x, \quad \alpha_x = -\sigma_{12}/\varepsilon_x$$

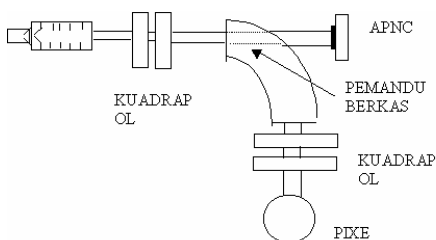
Parameter twiss alpha, beta, dan gamma juga merupakan parameter courant-syder, Gambar 2 ditunjukkan elips fase pada bidang horizontal dengan twiss parameter.



Gambar 2. Fase elips dengan twiss parameter

METODOLOGI DAN TATA KERJA

Alur berkas yang akan disimulasikan dengan program PBO tata letaknya seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Dalam program ini tidak menggunakan kode seperti pada program transport, tetapi mengambil slide komponen akselerator yang ada dalam menu program serta mengurutkannya seperti pada tataletak diatas. Dari gambar tersebut terdiri dari dua eksperimen yaitu ion deuterium yang ditumbukkan ke tritium target sehingga terjadi hamburan neutron cepat dimanfaatkan untuk eksperimen APNC. Sedangkan eksperimen yang kedua proton dari pemercepat dibelokkan dikenakan ke target untuk analisis dengan PIXE energi rendah.



Gambar 3. Tata letak akselerator J25

Ukuran diameter berkas ion pada keluaran tabung pemercepat diukur dengan menggunakan sepasang rotating probe dipasang dengan posisi horisontal dan vertikal pada jarak 6 cm, sedangkan ruji putaran 2,1 cm. Bentuk sinyal dari berkas ion diamati dengan rotating probe dan

penampil sinyal digunakan osiloskop Trio CS-1560 A. Pada saat kawat probe memotong berkas akan diperoleh sinyal pulsa baik pada potongan horisontal maupun vertikal. Apabila dua kali memotong dan pada penampil terlihat tiga sinyal atau lebih, maka akan dapat dicari diameter berkas kearah horisontal (pada sumbu X) atau vertikal (sumbu Y) serta penyebaran berkas yang terjadi.

Untuk eksperimen pengaktifan neutron menggunakan ion deuterium keluaran pemercepat dengan didukung oleh beberapa peralatan/komponen akselerator antara lain kuadrapol elektrostatis, *rotating probe*, pengukur arus dan tabung hanyut. Parameter awal secara global yang dimasukkan pada program PBO adalah muatan partikel, massa deuterium, energi pemercepat berkas, arus berkas 0,850 mA dan loncatan jejak dipasang 0,05 m. Parameter berkas yang dimasukkan dalam program ini baik kearah horisontal maupun vertikal adalah setengah pelebaran berkas dan sudut kemiringan. Data tersebut diperoleh dari hasil perhitungan dengan cara mengolah data yang diperoleh dari pengukuran sinyal dengan *rotating probe*. Program ini akan menghitung sendiri emitansi berkas kearah horisontal maupun vertikal. Data berkas dari sumbu axial tersebut dapat juga dikorelasikan langsung oleh program untuk menjadi parameter Twiss berkas ion.

Tabung hanyut merupakan komponen akselerator yang paling sederhana dari peralatan akselerator. Parameter yang perlu dimasukkan adalah panjang tabung hanyut dari titik berkas awal atau setelah keluar dari komponen akselerator sebelumnya. Dengan tidak adanya medan luar yang mempengaruhi berkas ion, maka bentuk elips ruang berkas tidak mengalami perubahan rotasi yang drastis.

Sistem pemokus terdiri dari dua buah kuadrapol elektrostatis saling berkaitan, yang satu berfungsi untuk memfokuskan berkas pada arah tertentu sedangkan yang lain tidak memfokuskan, sehingga diperlukan doublet

atau triplet. Parameter tetap yang dimasukkan dalam program untuk kuadrapol elektrostatis adalah panjang elektroda 6 cm. Terdiri dari 4 buah, diameter lubang 5 cm dan jarak elektroda 2,5 cm. Parameter variable yang dimasukkan adalah koefisien kuadrapol $K_1=k^2$, parameter ini amat menentukan tegangan listrik yang diberikan didasarkan pada hubungan ⁽⁴⁾:

$$k = 2/d (n V/E)^{1/2} \quad (7)$$

Dengan d = diameter lubang, V = tegangan potensial

n = nomor atom muatan ion, E = energi ion

Dengan adanya medan listrik ini, pengaruhnya besar sekali pada bentuk elips berkas, sehingga besarnya diameter berkas yang dihasilkan mengenai target tergantung dari koefisien kuadrapol.

Untuk eksperimen PIXE peralatan yang ditambahkan adalah magnet pembelok dan pemokus electromagnet, sedangkan ion yang digunakan adalah ion H^+ . Magnet pembelok disamping sebagai analisator juga membelokkan berkas ion, konstruksinya buatan sendiri dan tinggal menyesuaikan ukuran dimensi untuk dimasukkan dalam program. Parameter yang dimasukkan dalam program adalah sudut belok 90° , ruji kelengkungan 42 cm, jarak kutub 3,2 cm, tabung hanyut sebelum dan sesudah pembelok 19cm. Berdasar data tersebut program akan menghitung sendiri besarnya medan magnet berdasar pada massa maupun energi ion yang lewat.

Sebelum mencapai chamber PIXE berkas ion perlu difokuskan dulu dengan kuadrapol magnet doblot, sesuai yang telah tersedia. Parameter yang dimasukkan dalam kuadrapol magnet antara lain panjang efektif magnet, ruji lubang kuadrapol, Sedangkan parameter variable adalah medan sangat mempengaruhi bentuk berkas yang keluar dari kuadrapol.

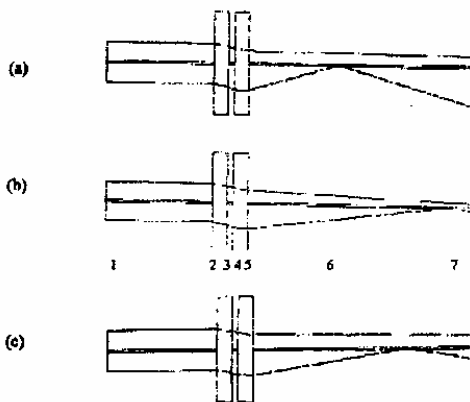
Transport berkas ion yang melalui komponen akselerator berupa amplop berkas dimana lintasan bagian luar tidak dapat

membedakan apabila lintasan tersebut melebihi dinding pemandu ion atau melampaui jarak kutub. Oleh karena itu pada posisi berkas yang diinginkan dapat dibatasi dengan program "fitting" yang tersedia. Jika program dijalankan, maka akan menghitung sendiri besarnya parameter variable pada komponen akselerator. Program "fitting" ini untuk membatasi amplop berkas yang melewati dan program akan menghitung variable komponen akselerator yang diinginkan untuk dirubah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum memasukkan data komponen peralatan akselerator kedalam program PBO, harus diketahui lebih dahulu karakteristik berkas pada awalnya. Pengukuran profil berkas dengan menggunakan rotating probe pada keluaran tabung pemercepat. Rotating probe terdiri dari 2 buah kawat yang berputar dengan arah horisontal dan vertikal untuk memotong berkas ion sambil mengeluarkan sinyal. Dari hasil pengukuran profil berkas dari kedua sinyal tersebut dapat dihitung diameter berkas dan sudut kemiringan. Diameter berkas pada posisi awal arah horizontal adalah 38,46 mm, sudut kemiringan 0,471 mr. sedangkan pada arah vertical diameter 39,36 mm dan sudut kemiringan 0,454 mr. ⁽⁵⁾

Untuk eksperimen APNC, ion yang digunakan adalah deterium, pemercepat 150 kV dengan menggunakan kuadrapol listrik, sehingga parameter yang divariasi adalah koefisien kuadrapol. Hasil perhitungan program PBO serta transpor berkas komponen akselerator ditunjukkan pada Gambar 4a - 4c. Bentuk tabung hanyut yang lewat pembelok disebut pemandu berkas, mempunyai bentuk dimensi ukuran 3,5 cm x 10 cm.



Gambar 4. Transpor berkas untuk eksperimen APNC dengan me “fitting”
; a) pada ujung pemandu,
; b) pada target,
; c) keduanya .

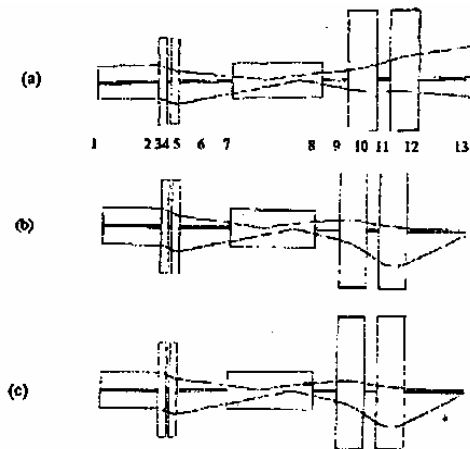
Supaya amplop berkas ion tidak menumbuk dinding, maka perludipasang “fitting” pada program untuk membatasi amplop berkas.

Pada Gambar 4a, ukuran amplop berkas pada ujung pemandu berkas ion dengan ruji kearah horizontal maupun vertikal adalah 12mm. Sedangkan pada target ruji ke arah horisontal 10,90 mm dan kearah vertikal 40,9 mm. Hasil tersebut merupakan perhitungan program dengan menggunakan “fitting” pada arah masuk pemandu berkas. Program akan menghitung sendiri dan memperoleh harga koefisien kuadrapol 73,7664 dan -102,0442.

Pada Gambar 4b hasil dari program “fitting” diletakkan pada ujung target dengan batasan ruji ke arah X maupun Y adalah 4 mm. Hasil transpor berkas menunjukkan bahwa ruji berkas ke arah X adalah 11,49 mm dan ke arah Y adalah 20,5 mm pada ujung masuk pemandu dan koefisien kuadrapol masing-masing diperoleh 68,9244 dan -69,4428.

Pada Gambar 4c hasil program dengan me “fitting” pada ujung pemandu dan target, masing-masing dengan ruji berkas baik kearah X maupun Y adalah 15 mm dan 12 mm. Hasil transpor berkas menunjukkan

bahwa ruji berkas pada arah X dan Y pada ujung pemandu adalah 13,16 mm dan 17mm, sedangkan pada target ruji berkas ke arah X dan Y adalah 11,6 mm dan 13,4 mm. Hasil tersebut diperoleh dari menjalankan program dengan harga koefisien kuadrapol listrik masing-masing 59,089 dan -74,6785 . Dari ketiga amplop berkas untuk eksperimen APNC yang paling aman berkas tidak menumbuk dinding pemandu berkas adalah Gambar 4c, hal ini didasarkan pada dimensi pemandu berkas yang tersedia 3,5 cm x 10cm. Apabila dihitung dari persamaan (7) atau dari acuan ⁽⁵⁾ hubungan antara koefisien kuadrapol dan tegangan kuadrapol untuk kuadrapol listrik , maka untuk koefisien kuadrapol $K_1 = 59,0896$ diperoleh tegangan kuadrapol 2,77 kV., sedangkan pada koefisien kuadrapol $K_1 = -74,6785$ diperoleh tegangan kuadrapol - 3,5 kV.



Gambar 5. Transpor berkas untuk eksperimen PIXE

Untuk eksperimen PIXE ion yang digunakan adalah proton dengan tegangan pemercepat 150 kV. menggunakan peralatan pemokus kuadrapol listrik sebelum pembelok magnet 90° dan kuadrapol magnet sesudah pembelok. Parameter yang memungkinkan divariasi adalah koefisien kuadrapol untuk kuadrapol listrik dan besarnya medan magnet untuk kuadrapol magnet. Hasil perhitungan program PBO

serta transpor berkas ion pada komponen akselerator untuk eksperimen PIXE ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5a amplop berkas yang di "*fitting*" pada masukan kuadrapol magnet dengan ruji ke arah X dan Y adalah 10 mm dan parameter yang dibuat variabel adalah koefisien kuadrapol listrik. Hasil perhitungan program ternyata amplop berkas yang keluar kuadrapol magnet dengan ruji ke X dan ke Y adalah 35,49 mm dan 22,36 mm, besarnya koefisien kuadrapol adalah 69,3056 dan -73,7279. Amplop berkas ini melebihi batas dinding tabung hanyut yang mempunyai diameter 50mm dalam kuadrapol magnet. Kalau dihitung besarnya tegangan yang harus diberikan pada kuadrapol listrik adalah 6,49 kV dan -6,92 kV, harga ini kemudian dimasukkan sebagai harga tetap. Pada Gambar 5b, amplop berkas yang di "*fitting*" pada keluaran berkas kuadrapol magnet atau yang mengenai target dengan ruji ke arah X dan Y adalah bervariasi. Untuk ruji 1,5 mm dan setelah menjalankan program diperoleh besarnya medan magnet 0,5010 kG. dan -0,5786 kG. Sedangkan untuk "*fitting*" dengan ruji 1 mm (Gambar 5c), hasil yang diperoleh besarnya medan magnet adalah 0,5053 kG dan -0,5833 kG, dan amplop berkas pada target dengan ruji ke arah X dan Y adalah 1,3 mm dan 1mm. Hal ini menunjukkan bahwa "*fitting*" pada target dengan ruji 1mm merupakan batas kemampuan magnet kuadrapol pada susunan diatas mampu untuk memfokuskan amplop berkas. Untuk lebih dapat fokus lagi perlu diupayakan lainnya seperti diberi diafragma setelah kuadrapol magnet. Data amplop berkas pada setiap komponen akselerator untuk susunan eksperimen APNC maupun susunan eksperimen PIXE ditunjukkan pada lampiran 1. Data tersebut berupa pelebaran berkas kearah horizontal maupun vertical dan parameter alpha dan beta Twiss. Sedangkan pada lampiran 2 ditunjukkan bentuk akhir dari elips fase amplop berkas pada bidang X dan Y dari hasil program Gambar 4c dan 5b.

KESIMPULAN

Simulasi transpor berkas untuk eksperimen APNC dilakukan pada tegangan pemercepat 150 kV, arus 0,850 mA menggunakan ion deuterium. Hasil perhitungan program dengan me "*fitting*" pada ujung pemandu, tempat target, serta ujung pemandu dan target dapat disimpulkan bahwa pilihan terakhir merupakan pilihan yang paling tepat dibandingkan dimensi pemandu yang tersedia 35 mm x 100 mm.

Dengan me "*fitting*" ujung pemandu 15 mm dan target 12mm, amplop berkas pada target ke arah X dan Y adalah 11,63mm dan 13,36 mm, dengan tegangan pada kuadrapol listrik 2,77kV dan 3,5 kV.

Simulasi transpor berkas untuk eksperimen PIXE dilakukan pada tegangan pemercepat 150 kV, arus 0,850 mA menggunakan hidrogen. Hasil perhitungan program me "*fitting*" pada masukan kuadrapol magnet dengan ruji 10 mm, diperoleh koefisien kuadrapol $69,3056\text{m}^{-2}$ dan $-73,7274\text{m}^{-2}$ atau pada tegangan kuadrapol listrik 6,49 kV dan -6,92 kV dan dipakai sebagai parameter tetap.

Dengan me "*fitting*" bervariasi antara lain pada target pixe dengan ruji 1 mm, amplop berkas ke arah X dan Y pada target adalah 1,3 mm dan 1mm. Hal ini merupakan batas kemampuan magnet kuadrapol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya makalah ini, kami ucapkan terima kasih kepada staf kelompok pengembangan atas bantuan dan partisipasi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. George Gillespie, dkk., Outline of Particle Beam Optics Laboratory Tutorial Version 1.1.1, G.H. Gillespie Associates Inc. 1998.
2. Browm, KL., dkk., Transport a Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport

Systems, CERN Report 73-16, Geneva (1973).

3. Wiedner C.A, Beam transport system, accelerator school, Center for Research and Development of Advanced Technology, 2003.

4. Shiroh KIKUCHI, Suehiro TAKEUCHI, A Computer Code “Beam” for the Ion Optics Calculation of the JAERI Accelerator System, JAERI 1987..

5. Sigit Hariyanto dkk., Simulasi Alir Berkas Partikel Akselerator J 2.5 Untuk Eksperimen Pixe Energi Rendah, Prosiding PPI, P3TM, Yogyakarta, 2002.

LAMPIRAN

Data amplop transpor berkas untuk susunan eksperimen APNC :

Data Gambar 4a.

No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	16.69974	22.37770	151.81100	31.17751
4.	.53500	14.66686	24.65526	133.44390	24.06950
5.	.59500	12.26129	25.40110	1.79753	16.81321
6.	.79500	12.00000	12.00000	1.74720	16.10426
7.	1.58500	10.98727	40.93688	1.54839	13.50075

Data Gambar 4b :

No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	17.12574	21.90361	129.53020	32.76716
4.	.53500	15.43327	23.77037	116.87080	26.64314
5.	.59500	13.16968	25.15644	13.72631	19.39658
6.	.79500	11.30655	19.26951	11.77333	14.29674
7.	1.58500	4.00002	4.00000	4.05879	1.78938

Data Gambar 4c.

No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	17.18687	21.83617	126.37660	33.04173
4.	.53500	15.54349	23.64474	114.22900	27.01017
5.	.59500	13.55692	24.68565	2.97254	20.55420
6.	.79500	13.16546	17.00043	2.87683	19.38432
7.	1.58500	11.63427	13.36172	2.49878	15.13759

Data amplop transpor berkas untuk susunan eksperimen PIXE:

Data Gambar 5a.

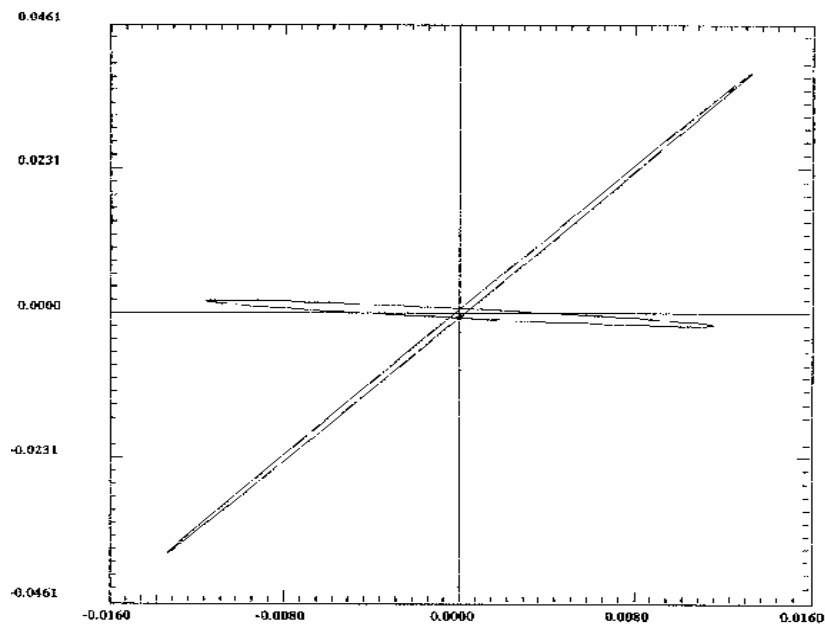
No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	16.84733	22.21262	144.25330	31.72266
4.	.53500	14.93208	24.34679	127.91260	24.93154
5.	.59500	12.15534	26.08502	24.45052	16.52420
6.	.79500	8.55941	20.34243	17.20234	8.19343
7.	.98500	5.14880	14.88734	10.31697	2.96477
8.	1.64473	7.53098	4.33051	-10.93339	6.34283
9.	1.83473	10.00000	10.00000	-14.54437	11.18373
10.	2.04473	15.62028	13.31796	-74.72096	27.29091
11.	2.14473	19.89711	13.35728	-95.18291	44.28134
12.	2.35473	26.41353	14.93453	-53.63391	78.03345
13.	2.85473	35.49120	22.38635	-72.08816	140.91780

Data Gambar 5b :

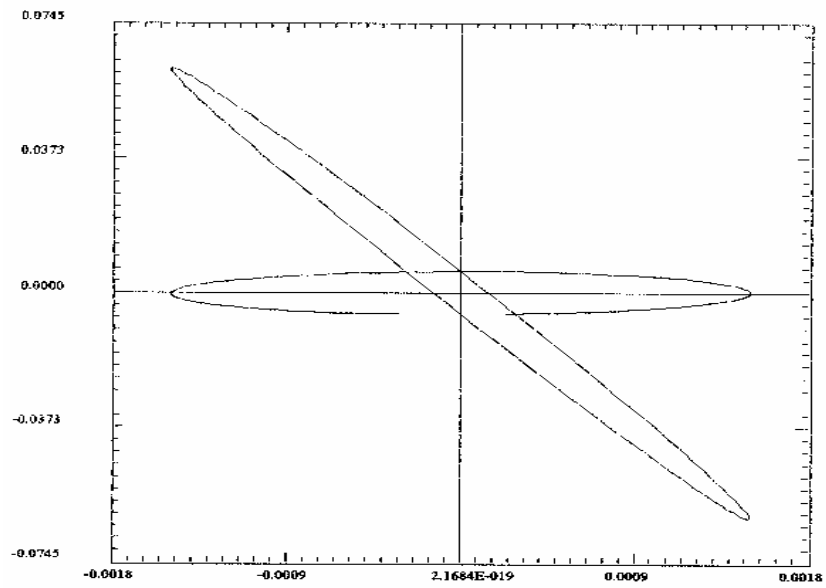
No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	16.84733	22.21262	144.25330	31.72266
4.	.53500	14.93208	24.34679	127.91260	24.93154
5.	.59500	12.15534	26.08503	24.45007	16.52374
6.	.79500	8.55937	20.34250	17.20277	8.19352
7.	.98500	5.14873	14.88747	10.31689	2.96468
8.	1.64473	7.53106	4.33019	-10.93334	6.34294
9.	1.83473	10.00005	9.99963	-14.54403	11.18366
10.	2.04473	8.67866	21.36268	24.01773	8.42324
11.	2.14473	6.20491	29.90413	17.15783	4.30579
12.	2.35473	3.26519	32.55512	1.93734	1.19233
13.	2.85473	1.50000	1.50000	-.05594	.25163

Data Gambar 5c.

No.	LENGTH	XBEAM	YBEAM	ALPHAX	BETAX
1.	.00000	19.23001	19.71301	.16400	41.35590
2.	.45000	19.19683	19.70407	.15283	41.21333
3.	.51000	16.84733	22.21262	144.25330	31.72266
4.	.53500	14.93208	24.34679	127.91260	24.93154
5.	.59500	12.15534	26.08503	24.45007	16.52374
6.	.79500	8.55937	20.34250	17.20277	8.19352
7.	.98500	5.14873	14.88747	10.31689	2.96468
8.	1.64473	7.53106	4.33019	-10.93334	6.34294
9.	1.83473	10.00005	9.99963	-14.54403	11.18366
10.	2.04473	8.64583	21.40950	24.20184	8.35973
11.	2.14473	6.14369	30.00449	17.18329	4.22120
12.	2.35473	3.12499	32.59556	2.04004	1.09213
13.	2.85473	1.44549	1.00480	-.32313	.23367



Gambar 1. Elips fase untuk eksperimen APNC



Gambar 2. Elips fase untuk eksperimen PIXE