

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM MAGNET SIKLOTRON 30 MeV UNTUK SUMBER NEUTRON EPITHERMAL BNCT

Slamet Santosa dan Taufik

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

email : santosa@batan.go.id, taufik@batan.go.id

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL SISEM MAGNET SIKLOTRON 30 MeV UNTUK SUMBER NEUTRON EPITHERMAL BNCT. Telah dilakukan konseptual desain sistem magnet siklotron 30 MeV untuk sumber neutron epithermal pada BNCT berdasar metode empiris model persamaan dasar, pengalaman desain magnet siklotron 13 MeV dan komunikasi personal. Dalam bidang kesehatan, siklotron dapat digunakan sebagai sumber neutron epithermal untuk Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). Pengembangan siklotron penghasil neutron epithermal untuk BNCT telah dilakukan di Kyoto University yang dapat memproduksi arus berkas proton 1,1 mA dengan energi 30 MeV. Dengan pengalaman mendesain magnet siklotron 13 MeV, untuk mendukung program litbang BNCT di PSTA-BATAN, dilakukan studi desain sistem magnet siklotron 30 MeV, salah satu komponen utama siklotron adalah untuk membelokkan berkas partikel proton sehingga lintasannya melingkar dan berfungsi sebagai pemfokus berkas. Hasil studi ini diharapkan dapat menentukan parameter siklotron khususnya magnet. Ruang lingkup studi ini meliputi studi parameter-parameter komponen siklotron 30 MeV dan parameter awal magnet siklotron. Metode empiris model persamaan dasar dikuatkan dengan simulasi menggunakan simulator Superfish. Berdasarkan hasil studi, sistem magnet siklotron 30 MeV untuk sumber neutron BNCT memungkinkan direalisasi dengan parameter $B_0 = 1,06$ T, frekuensi RF = $64,733938 \approx 65$ MHz, jari-jari eksternal 0,73 m, jari-jari kutub 0,85 m, $B_H = 1,95$ T dan celah hill 4 cm. Karena arus berkas proton yang diperlukan untuk BNCT sangat besar maka berdasarkan perhitungan dipilih pemfokusan aksial (v_z) yang besar yaitu 0,630361 dan menghasilkan $B_V = 0,44$ T.

Kata-kunci: desain konseptual, magnet siklotron, neutron epithermal, BNCT

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF 30 MeV MAGNET SYSTEM USED FOR BNCT EPITHERMAL NEUTRON SOURCE. Conceptual design of 30 MeV Magnet System Used for BNCT Epithermal Neutron Source has been done based on methods of empirical model of basic equation, experiences of 13 MeV cyclotron magnet design and personal communications. In the field of health, cyclotron can be used as an epithermal neutron source for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). The development of cyclotron producing epithermal neutrons for BNCT has been performed at Kyoto University, of which it produces a proton beam current of 1.1 mA with energy of 30 MeV. With some experiences on 13 MeV cyclotron magnet design, to support BNCT research and development we performed the design studies of 30 MeV cyclotron magnet system, which is one of the main components of the cyclotron for deflecting proton beam into circular trajectory and serves as beam focusing. Results of this study are expected to define the parameters of particular cyclotron magnet. The scope of this study includes the study of the parameters component of the 30 MeV cyclotron and magnet initial parameters. The empirical method of basic equation model is then corroborated by a simulation using Superfish software. Based on the results, a 30 MeV cyclotron magnet for BNCT neutron source enables to be realized with the parameters of $B_0 = 1.06$ T, frequency RF = $64.733938 \approx 65$ MHz, the external radius of 0.73 m, the radius of the polar = 0.85 m, $B_H = 1.95$ T and a gap hill of 4 cm. Because proton beam current that be needed for BNCT application is very large, then in the calculation it is chosen a great focusing axial $v_z = 0.630361$ which can generate $B_V = 0.44$ T.

Keyword: conceptual design, cyclotron magnet, epithermal neutron, BNCT

PENDAHULUAN

Dalam bidang kesehatan, selain digunakan sebagai produksi radioisotop untuk diagnosa *cancer*, siklotron dapat digunakan sebagai penghasil neutron epithermal pada *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT), untuk terapi *cancer* [1, 2]. Pada awalnya BNCT dikembangkan dengan menggunakan neutron yang berasal dari reaktor fisi [3, 4], akan tetapi seiring perkembangan sumber neutron yang jauh lebih kompak, ekonomis dan berkenaan dengan

alasan keselamatan radiologi, maka penggunaan reaktor fisi dapat digantikan dengan akselerator siklotron ataupun *linac*. Saat ini Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA-BATAN) mempunyai kegiatan rancang-bangun siklotron proton 13 MeV untuk produksi radioisotop *Positron Emission Tomography* (PET) yang saat ini sudah masuk tahapan konstruksi komponen-komponennya. Dengan pengalaman mendesain sistem magnet siklotron 13 MeV, maka dilakukan studi penggunaan siklotron untuk sumber neutron BNCT.

Kyoto University telah mengembangkan siklotron penghasil neutron epitermal yang diberi nama C-BENS, yang nantinya akan dimanfaatkan untuk sumber neutron BNCT. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, C-BENS dapat memproduksi arus berkas proton sebesar 1,1 mA dengan energi 30 MeV. Dari karakteristik berkas proton C-BENS dan simulasi monte carlo dengan menggunakan target berilium, fluks neutron epitermal diperoleh $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Setelah dilakukan eksperimen, intensitas dari neutron epitermal diperoleh $1,2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [1]. Oleh karena itu untuk dapat digunakan sebagai sumber neutron BNCT, sistem magnet siklotron perlu didesain dengan arus berkas proton 1,1 mA dan energi 30 MeV.

Siklotron terdiri dari beberapa komponen, salah satu komponen utama siklotron adalah sistem magnet. Magnet berfungsi untuk membelokkan berkas partikel sehingga lintasannya melingkar dan berfungsi sebagai pemfokus berkas, sehingga akan menentukan optimasi berkas proton yang mencapai target. Desain magnet juga akan bergantung pada komponen-komponen siklotron lainnya. Oleh karena itu perlu dilakukan studi desain awal sistem magnet siklotron sebagai sumber neutron BNCT. Studi juga dikuatkan secara perhitungan dengan persamaan model dan simulasi menggunakan perangkat lunak Superfish. Hasil studi ini diharapkan dapat menentukan parameter-parameter siklotron khususnya sistem magnet.

METODOLOGI

Ruang lingkup studi ini meliputi parameter-parameter umum komponen siklotron 30 MeV dan parameter awal sistem magnet siklotron. Parameter detail yang meliputi parameter lain untuk memenuhi persyaratan isokronus sistem magnet dan gambar teknik belum dicakup dalam penelitian ini. Metodologi yang digunakan dalam pembuatan konseptual desain magnet ini meliputi metode empiris yang didasarkan pada beberapa literatur terkait desain siklotron yang telah beroperasi, pengalaman desain sistem magnet siklotron 13 MeV dan komunikasi personal dengan expert dalam bidang teknologi siklotron. Metode semi teoritis dilakukan berdasar pada persamaan-persamaan model dasar yang terkait dengan desain sistem magnet.

Prinsip kerja siklotron adalah didasarkan pada gaya Lorentz (F_L)

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

dengan partikel bermuatan (q) yang memiliki kecepatan (\vec{v}) dipercepat dengan medan listrik (\vec{E}) dan dibelokkan dengan induksi medan magnet (\vec{B}) [3]. Persamaan gerak sebuah partikel dengan massa (m) dan muatan (q) yang bergerak dengan kecepatan (\vec{v}) dalam suatu medan magnet dengan induksi (\vec{B}) dinyatakan dalam persamaan

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

dengan vektor \vec{B} diasumsikan ke arah aksial atau hanya dalam komponen z sebesar B , sedangkan \vec{v} adalah tegak lurus dengan \vec{B} sehingga akibatnya F_L pada persamaan (2) mengakibatkan lintasan partikel menjadi melingkar. Gaya Lorentz ini berperan sebagai gaya sentripetal dan dituliskan dalam persamaan [4]

$$F_L = m \frac{v^2}{\rho} = qvB \quad (3)$$

Untuk partikel dengan energi yang tinggi, faktor relativitas (γ) harus sudah diperhitungkan, dengan demikian persamaan (3) dapat dinyatakan sebagai

$$\gamma m_0 \frac{v^2}{\rho} = qvB \quad (4)$$

dengan m_0 adalah massa diam partikel. Dari persamaan (4) frekuensi orbit partikel (f) dapat diperoleh

$$\omega = 2\pi f = \frac{qB}{\gamma m_0} \quad (5)$$

Untuk memperoleh percepatan yang berulang maka frekuensi orbit harus beresonansi dengan frekuensi RF (f_{RF}) sistem pemercepat. Resonansi diperoleh jika frekuensi orbit sama dengan frekuensi RF atau lebih tinggi dengan kelipatan bilangan harmonik (n_h) lebih besar daripada 1

$$f_{RF} = n_h \frac{\omega}{2\pi} \quad (6)$$

Energi kinetik (T) partikel yang dipercepat pada siklotron dapat ditentukan dengan persamaan (4)

$$T = 0,2046 A \frac{2\gamma^2}{\gamma+1} \rho^2 \left(\frac{f_{RF}}{n_h} \right)^2 \quad (7)$$

dengan A adalah massa proton.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada konseptual desain siklotron 30 MeV ini, komposisi kutub magnet menggunakan harmonik ke-4 dan jenis ion yang dipercepat adalah ion H . Penentuan jenis ion H sebagai partikel yang dipercepat pada siklotron disebabkan karena metode ekstraksi dengan foil karbon (*stripper*) memiliki efisiensi yang dapat mencapai 100%, tidak menyebabkan lucutan listrik dan arus berkas yang besar[5]. Untuk menghasilkan arus yang besar, sumber

ion ditentukan menggunakan sumber ion eksternal. Pada tipe sumber ion eksternal, komponen untuk proses ionisasi disimpan di luar vakum dan ion diinjeksikan ke pusat magnet pada ruang vakum secara aksial melalui sebuah inflektor.

Dalam desain, penentuan medan magnet yang diperlukan harus memenuhi kondisi isokronus sesuai dengan persamaan

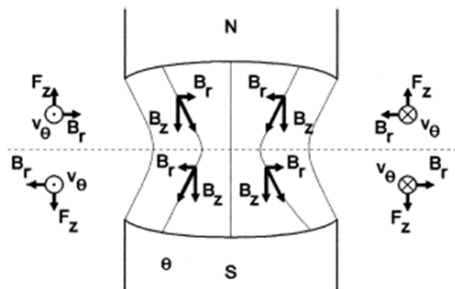
$$f = \frac{q B_{ext}}{2\pi\gamma m_0} = \frac{q B_0}{2\pi m_0} = \text{konstan} \quad (8)$$

dengan B_{ext} adalah medan magnet di titik ekstraksi dan B_0 adalah medan magnet pada titik pusat magnet.

Untuk siklotron dengan energi 30 MeV, B_0 ditentukan sebesar 1,06 T (Tesla) sehingga diperoleh $f = 16,183485$ MHz. Dengan menggunakan harmonik ke-4 maka frekuensi RF-nya adalah $4 \times 16,183485$ Mhz = $64,733938 \approx 65$ MHz. Penentuan $B_0 = 1,06$ T ini mengacu pada desain siklotron KIRAMS-30 dan pertimbangan kemudahan dalam mendapatkan komponen elektronika RF generator. Medan magnet pada titik ekstraksi dapat ditentukan dengan $B_{ext} = \gamma B_0 = 1,094$ T. Penentuan jari-jari ekstraksi berkas ditentukan sesuai dengan persamaan kekakuan magnet (*magnet rigidity*) sebagai berikut (9)

$$B_{ext} R_{ext} = \frac{M_0 c^2 \beta \gamma}{c q} \quad (9)$$

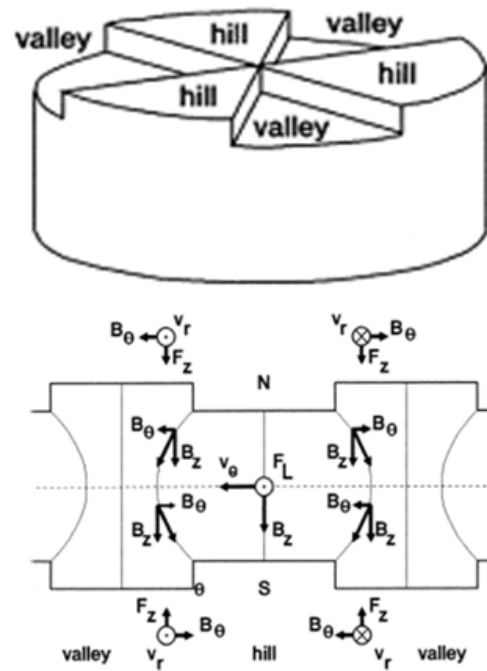
dan diperoleh $R_{ext} = 0,73$ meter.



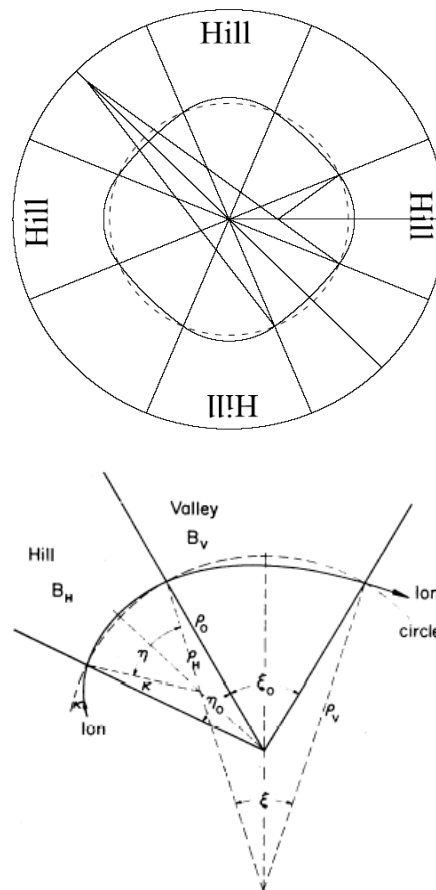
Axial orbit instability for $n < 0$

Gambar 1. Defocusing aksial.

Medan magnet yang membesar secara radial dapat mengakibatkan penyebaran (*defocusing*) partikel secara aksial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, akibatnya partikel bisa bertumbukan dengan kutub magnet. Untuk itu pemfokusan aksial dapat dibuat menggunakan *Thomas focusing* dimana kutub magnet dibuat hill-valley (sektor) seperti pada Gambar 2. Dengan adanya sektor pada kutub magnet, maka lintasan partikel tidak berbentuk lingkaran lagi akan tetapi sedikit lonjong pada bagian hill seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Thomas focusing.



Gambar 3. Lintasan partikel pada medan sektor.

Untuk menentukan besarnya kuat medan pada Hill (B_H) dan kuat medan pada Valley (B_V) pada magnet sektor digunakan persamaan berikut

$$\frac{N\eta}{B_H} + \frac{N\xi}{B_V} = \frac{1}{\gamma} \frac{qT}{m_0} = \frac{2\pi}{\gamma B_0} = \frac{2\pi}{B} \quad (10)$$

dengan N adalah jumlah sektor (satu pasang hill-valley), η adalah sudut pembelokkan partikel pada hill, ξ adalah sudut pembelokkan pada valley, B_H adalah kuat medan pada hill, B_V adalah kuat medan pada valley, T adalah periode revolusi partikel dan \bar{B} adalah kuat medan rata-rata. Sedangkan untuk menentukan sudut hill η_0 dan sudut valley ξ_0 digunakan persamaan berikut :

$$\eta_0 = 2 \cos^{-1} \left(\frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \right), \quad \xi_0 = \frac{2\pi}{N} - \eta_0 \quad (11)$$

dengan

$$B = \cot \frac{1}{2} \eta_0 = \cot \frac{\pi}{N} + \frac{B_H}{B_V} \left(\cot \frac{1}{2} \eta - \cot \frac{\pi}{N} \right).$$

Sementara itu, frekuensi radial betatron (ν_r) dan aksial betatron ν_z secara pendekatan ditentukan berdasarkan persamaan :

$$\left. \begin{aligned} \nu_r^2(r) &= 1 + (\beta\lambda)^2 + \frac{(B_H - \bar{B})(\bar{B} - B_V)}{\bar{B}^2} \frac{(\beta\lambda)^4}{N^2} \\ \nu_z^2 &= -\frac{\beta^2}{1-\beta^2} + \frac{(B_H - \bar{B})(\bar{B} - B_V)}{\bar{B}^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

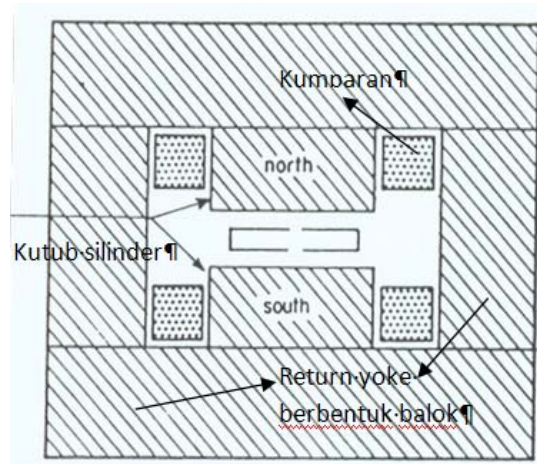
Berdasarkan persamaan (10), (11) dan (12) beberapa kemungkinan parameter siklotron 30 MeV diperoleh pada Tabel 1. Dari Tabel 1, maka ditentukan parameter siklotron pada huruf yang ditandai dengan cetak tebal. Penentuan $B_H = 1,95$ T dan celah *hill* (g_H) 4 cm berdasarkan pada kemampuan optimal dari bahan *low carbon steel* untuk menghasilkan medan magnet.

Medan magnet yang digunakan dalam siklotron pada umumnya menggunakan magnet elektromagnetik di mana medan magnet dibangkitkan dengan cara memberi arus pada kumparan yang dililitkan pada inti besi lunak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Bahan magnet siklotron direncanakan menggunakan *low carbon steel* S10C atau S1010. Kuat medan listrik yang dihasilkan dari kumparan arus berbanding lurus dengan jumlah lilitan (N) dan arus (I) serta berbanding tebal dengan lebar celah (g) dengan persamaan sebagai berikut

$$B = \frac{\mu_0 NI}{c} \quad (13)$$

dengan μ_0 adalah permeabilitas udara $4\pi \times 10^{-7}$, $B_H = 1,95$ T, celah hill (g_H) 4 cm maka besarnya lilit-ampere ($N \cdot I$) yang dibutuhkan adalah 62.070 lilit-ampere.

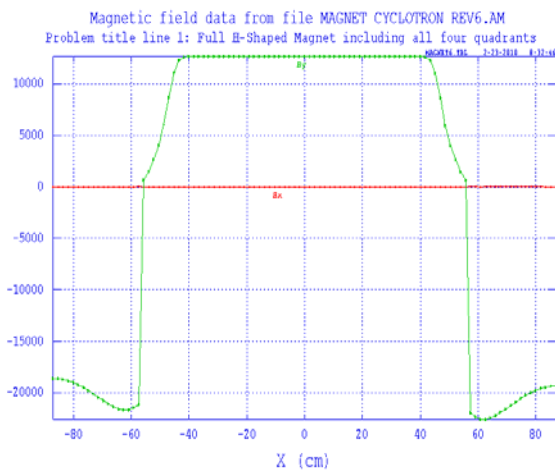


Gambar 4. Elektromagnet.

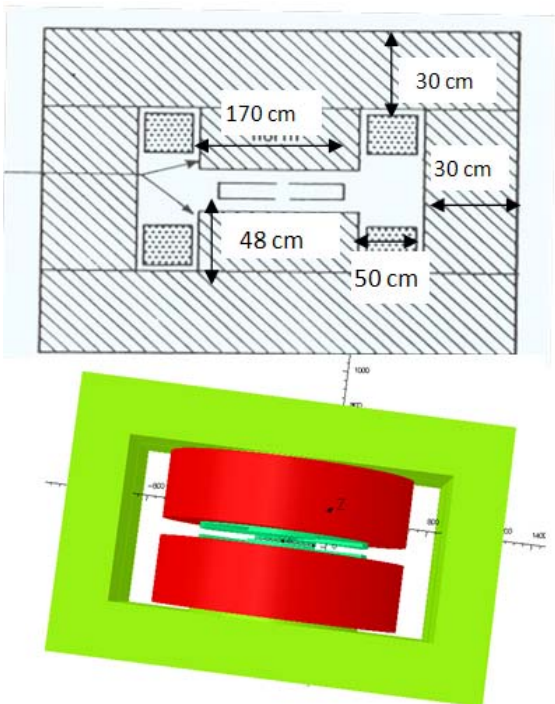
Kuat medan magnet pada tepi kutub lebih kecil dari pusat kutub yang dikenal dengan efek tepi. Untuk menghindari titik ekstraksi dari efek tepi maka jari-jari kutub magnet harus lebih besar dari jari-jari ekstraksi. Distribusi medan pada kutub dapat disimulasikan secara 2 dimensi menggunakan program *superfish* dengan jari-jari kutub 48 cm dan tebal *return yoke* 30 cm yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5 [6]. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa pada jari-jari (X) 41 cm medan magnet masih seragam dengan medan magnet pusat. Oleh karena itu agar pada jari-jari ekstraksi 73 cm medan magnetnya masih seragam dengan pusat magnet maka jari-jari kutub dibuat 85 cm.

Tabel 1. Hasil perhitungan.

η (o)	B_H (T)	B_V (T)	η_0 (°)	V_z	g_H (cm)	g_V (cm)	V_r
46	1.95	0.747727	24.9155	0.425836	4	10.40379	1.03197
50	1.95	0.706255	27.03293	0.460914	4	11.04417	1.031974
55.1	1.95	0.64604	29.72992	0.505497	4	12.07355	1.03198
60	1.95	0.582427	32.32058	0.548675	4	13.39223	1.031986
62.1	1.95	0.553224	33.43131	0.567397	4	14.09917	1.031988
69	1.95	0.447826	37.08567	0.630361	4	17.41747	1.031998



Gambar 5. Hasil simulasi superfish.



Gambar 6. Dimensi elektromagnet.

Dalam perancangan sumber magnet, $N \cdot I$ harus lebih besar dari $N \cdot I$ ideal yang telah dihitung, yaitu 62.070. Untuk angka keamanan $N \cdot I$ diambil 1,2% dari $N \cdot I$ ideal dan diperoleh $N \cdot I = 77.588$ lilit-ampere. Sumber arus (I) yang digunakan ditentukan 200 A dengan demikian jumlah lilitannya menjadi 388 lilit yang dibagi menjadi 2 kumparan pada kutub utara dan kutub selatan, dengan demikian masing-masing kutub dililitkan kumparan 200 lilit. Kabel yang digunakan untuk kumparan adalah kabel *hollow* berbentuk kotak dengan panjang sisi 2 cm, diameter *hollow*/lubang 8

mm. Dengan menggunakan tahanan jenis (ρ) kawat $5,8 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, maka daya total yang diperlukan adalah 9 kWatt. Dari hasil perhitungan, dimensi medan magnet dapat diperoleh seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi ini magnet siklotron 30 MeV untuk keperluan BNCT dapat dibuat dengan parameter B_0 sebesar 1,06 T, frekuensi RF = $64,733938 \approx 65$ MHz, jari-jari eksternal 0,73 m, jari-jari kutub 0,85 m, $B_H = 1,95$ T dan celah *hill* 4 cm. Karena arus berkas proton yang diperlukan untuk BNCT sangat besar maka berdasarkan perhitungan dipilih pemfokusan aksial (ν_z) yang besar yaitu 0,630361 dan menghasilkan $B_V = 0,44$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] TANAKA, H., SAKURAI, Y., SUZUKI, M., MASUNAGA, S., MITSUMOTO, T., FUJITA, K., KASHINO, G., KINASHI, Y., LIU, Y., TAKADA, M., ONO, K., and MARUHASHI, A., *Experimental Verification of Beam Characteristics for Cyclotron-based Epithermal Neutron Source (C-BENS)*, Applied Radiation dan Isotopes 69, 1642-1645, 2011.
- [2] AKITSUGU SATO, YUSUKE TAKIZAWA, FUJIO HIRAGA, YOSHIKI KİYANAGI, *Neutron Slowing Down Efficiency Depending on the Proton Energi For Accelerator Based BNCT*, Physics Procedia. 60. 15 – 22, 2014.
- [3] BURIAN, J., FLIBOR, S., REJCHRT, J., VIERERBL, L., and TOMANDL, I., *Physics for BNCT*, Jurnal of physics : Conference Series **41**, EPS Euroconference XIX Nuclear Physics Divisional Conference, 174–186, 2006.
- [4] BARTH, et al, *Current Status of Boron Neutron Capture Therapy of High Grade Gliomas and Recurrent Head and Neck Cancer*, Radiation Oncology, 7-146, 2012.
- [5] LIVINGSTON, M.S., BLEWETT, J.P., *Particle Accelerators*, McGraw-Hill. Inc., New York, 1962.
- [6] STAMMBACH, T., *Cyclotrons, Linacs and Their Applications*, Proceeding Cern Accelerator School, CERN, Genewa, 113 – 133, 1996.
- [7] BOTMAN, J.I.M., HAGEDOORN, H.L., *Extraction from Cyclotron*, Proceeding of Cern Accelerator School, Geneva, 169 – 184, 1996.
- [8] TAUFİK, DARMAWAN, R.S. dan SANTOSA, S., Simulasi Awal Sistem Magnet Siklotron 13 MeV Menggunakan Superfish dan Opera-3D, Prosiding Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir 2010, PPIN-BATAN, Tangerang Selatan, halaman 173-184, 2010.

TANYA JAWAB**Hari Suryanto**

- *Ion source type* yang digunakan untuk memperoleh *beam current* sampai dengan 1 mA.
- Apakah *ion source* internal apa eksternal yang diinjeksikan dengan pemercepatan berkasnya eV.

Slamet Santosa

- Untuk mendapatkan arus berkas yang cukup besar, karena untuk sumber neutron diperlukan fluks yang tinggi, sumber neutron yang digunakan menggunakan tipe Multicusp sumber ion.

- Sumber ion Multicusp dipasang secara eksternal dan diinjeksikan ke dalam central region menggunakan spiral inflektor injektor.

Taxwim

- Bagaimana jika dibandingkan dengan menggunakan CNG (*Compact Neutron Generator*).

Slamet Santosa

- Apabila menggunakan *Compact Neutron Generator*, energi neutron yang didapat masih cukup tinggi (bergantung targetnya D atau T) sehingga perlu dilakukan moderasi yang bagaimanapun akan menurunkan fluks neutron yang dihasilkan.