

RANCANGBANGUN PERANGKAT MEKANIK PEMETAAN MEDAN MAGNET UNTUK SIKLOTRON *DECY 13*

Kurnia Wibowo, Silakhuudin, dan Slamet Santosa

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281

E-mail: kurniaw@batan.go.id

ABSTRAK

RANCANGBANGUN PERANGKAT MEKANIK PEMETAAN MEDAN MAGNET UNTUK SIKLOTRON *DECY 13*. Dalam kegiatan rancangbangun magnet siklotron yang memenuhi isokronus dan pemfokusan model azimuthally varying field (AVF) diperlukan perangkat untuk memetakan hasil pengukuran medan magnet pada gap di antara dua kutub magnet seluas permukaan kutub magnet siklotron. Telah dibuat perangkat pemetaan menggunakan Hall-probe yang akan digunakan untuk validasi desain elektromagnet siklotron di BATAN. Sistem pengukurannya dipasang pada suatu probe carrier x-y yang presisi, dan memetakan medan magnet dalam koordinat cartesian. Untuk mengurangi waktu akuisisi data, sistem ini menggunakan modus terbang (flying mode) dalam metode pemetaan medan magnet. Luasan yang dijangkau pengukuran sebesar 96 cm × 96 cm. Dengan kecepatan gerak pemetaan 10 mm/det, waktu yang diperlukan untuk penyelesaian pemetaan selama 45 menit.

Kata kunci : siklotron, medan magnet, perangkat pemetaan, Hall-probe

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF MECHANICAL DEVICE FOR MAGNETIC FIELD MAPPING OF *DECY 13* CYCLOTRON. The design of cyclotron magnet has to meet to isochronous pattern and azimuthally varying field (AVF) focussing, to fulfill the condition a mapping of magnetic field on the gap between poles of cyclotron magnet is required. A mapping system instrument using two Hall probe has been constructed and will be used to validate the design of electromagnetic cyclotron in BATAN. The measurement system is mounted on a precision x-y probe carrier, and maps the magnetic field in cartesian coordinates. To reduce the data acquisition time, the system uses flying mode in the magnetic field mapping. The accessible area of the measurement is 96 cm × 96 cm. With mapping velocity of 10 mm/sec, the time required for completion of the mapping is 45 minutes.

Keywords: cyclotron magnetic field, mapping instrument, Hall-probe.

PENDAHULUAN

Saat ini suatu teknologi akselerator jenis siklotron untuk diagnostik medis dengan teknik *Positron Emission Tomography* (PET) sudah mulai digunakan di Indonesia misalnya di rumah-rumah sakit Gading Pluit Jakarta^[1], Siloam (MRCCC) dan Dharmais Jakarta^[2]. Seiring dengan meningkatnya "gaya hidup" untuk semakin perhatian terhadap penanganan kesehatan, maka diprediksi di beberapa rumah sakit elit juga akan mengikuti jejak tersebut. BATAN sebagai satu-satunya lembaga litbang nasional dalam bidang teknologi nuklir merasa tertantang untuk ikut menyumbangkan karyanya agar dapat mewujudkan suatu siklotron untuk menghasilkan radioisotop yang digunakan dalam teknik PET. Kegiatan ini diwujudkan dalam program institusi berupa Desain dan Rancangbangun Siklotron untuk Produksi Radioisotop dan salah satunya adalah rancangbangun sistem magnet siklotron seperti tercantum dalam Renstra 2010-2014. Program ini sudah berjalan pada tahun 2010 dan 2011 dan telah diperoleh data-data perancangan sistem magnet. Kegiatan desain dan rancangbangun perangkat pemetaan medan magnet

ini adalah bertujuan untuk dapat menghasilkan suatu fasilitas yang dapat menilai validitas data-data perancangan sistem magnet siklotron yang telah dibuat tersebut.

Kegiatan penelitian di PTAPB dalam perancangan magnet siklotron sampai dengan tahun 2011 telah menghasilkan data distribusi medan magnet yang memenuhi kriteria isokronus relativistik antara fase partikel dengan fase RF. Selanjutnya sudah dibuat data-data perancangan yang terdiri atas data parameter sistem magnet dan detail gambar tekniknya. Data-data perancangan tersebut pada kegiatan tahun-tahun berikutnya akan diwujudkan dalam bentuk prototip sistem magnet. Yang menjadi permasalahan adalah apakah data-data perancangan yang telah dihitung telah dapat dijamin validitasnya yaitu memenuhi sifat isokronus dan *focussing*, maka perlu dibuat suatu perangkat pengukuran secara nyata besarnya medan magnet di banyak titik yang disebut *spacial mapping* medan magnet^[3,4]. Untuk itu diperlukan suatu fasilitas *spacial mapping* medan magnet yang sekarang belum tersedia di dalam negeri. Jadi, lingkup dan batasan

masalah yang ingin dipecahkan adalah mewujudkan hasil rancangbangun perangkat untuk membuat peta (*mapping*) medan magnet di dalam suatu siklotron yang murah dan dengan bahan konstruksi dalam negeri.

Pada makalah ini disajikan hasil dari kegiatan awal rancangbangun sistem mekanik dari peralatan pemetaan medan magnet siklotron. Isi penyajiannya terdiri atas kriteria rancangan, spesifikasi sistem yang hendak dicapai, hasil perhitungan rancangan dan hasil konstruksi beserta pengujian dari perangkat tersebut. Hasil dari rancangbangun ini akan dipakai untuk pemetaan medan magnet pada siklotron DECY 13.

TATA KERJA

Kriteria Rancangan

Kriteria rancangan sistem mekanik pemetaan (*mapping*) medan magnet untuk siklotron proton 13 MeV antara lain:

1. Posisi *probe* medan magnet dapat menjangkau dari seluruh posisi area medan magnet yang di bangkitkan oleh lilitan magnet yaitu sebesar ($1/4.d^2$) dengan diameter 960 mm ke arah sumbu x dan 960 mm ke arah sumbu y.
2. Mekanisme pergerakan *probe* menggunakan metode gerakan *fractal* arah sumbu x dan y.
3. *Hall probe carrier* terbuat dari bahan yang tidak mempengaruhi medan magnet yang diukur (bahan diamagnetik), ringan, dan kaku.
4. Ketelitian pengukuran 1 mm. (persyaratan perhitungan lintasan berkas ion pada siklotron).
5. Mengacu pada rancangan sistem pemetaan medan magnet siklotron KIRAMS^[4].

Spesifikasi Perangkat Pemetaan

Berdasarkan parameter rancangan sistem magnet siklotron 13 MeV, ditentukan spesifikasi peralatan *spacial mapping* untuk pengukuran medan magnet, parameter-parameter yang hendak dicapai disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter desain perangkat pemetaan medan magnet siklotron 13 mev

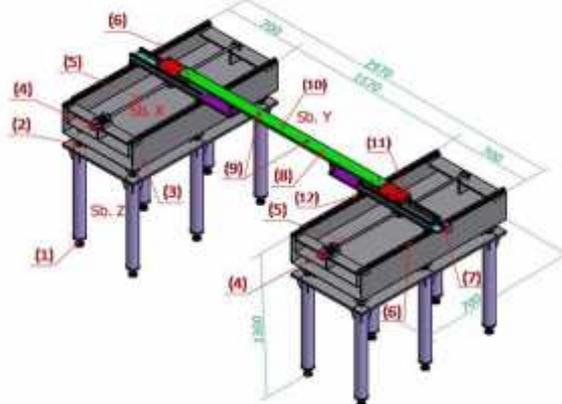
No	Jenis Parameter	Nilai Parameter
1.	Jumlah <i>Hall probe</i>	2 buah Hall probe
2.	Arah pemetaan	x dan y
3.	Metode pemetaan	<i>Flying mode</i>
4.	Kemampuan <i>scan</i> arah x	960 mm
5.	Kemampuan <i>scan</i> arah y	480 mm
6.	Kemampuan <i>scan</i> arah z	15 mm

7.	Ukuran spasi pengukuran	1 mm (sb.y), 10 mm (sb.x)
8.	Jangkauan pengukuran medan magnet	0-3 T
9.	Spesifikasi <i>Hall Probe</i>	MPT 141-Size 14 x 5 x 2 mm; <i>sensitive area</i> 1 x 0.5 mm; $\pm 0.01\%$ max error at 25°C

HASIL DAN PEMBAHASAN

Susunan Komponen (Hasil Rancangan Dasar)

Gambar rancangan mekanik dari perangkat pemetaan medan magnet sebagai fasilitas eksperimen validasi elektromagnet siklotron proton radioisotop yang dirancang di dasarnya pada DECY 13 seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat mapping validasi magnet DECY 13, angka penunjukan ukuran mm.

Tampakan muka dari sistem pemetaan ditunjukkan pada Gambar 1. Sistemnya terdiri atas dua *stage* yaitu *stage* untuk kesejajaran (1) dan (2) dan tingkat untuk pemetaan (3). Bidang x-y dan ketinggian tingkat pemetaan diatur menggunakan *slide bearing* dan *screws* pada *stage* pelurusan. *Stage* pemetaan terdiri atas 4 kereta (*carriage*) yaitu dua kereta untuk *stage-x* dan dua yang lain untuk *stage-y*. Masing-masing kereta untuk *stage-x* mempunyai satu *ball-screw* (5), dua rel pemandu (6) dan satu motor *stepper* sumbu-x (4). Satu kereta *stage-y* mempunyai satu *ball screw*, rel-rel pemandu dan satu motor *stepper* *stage-y* (7), sedangkan kereta yang satunya hanya mempunyai rel pemandu. Kereta untuk *stage-y* dipasang pada blok rel pemandu *stage-x* (12). Pembawa (*carrier*) *Hall probe* (8) dirangkai pada blok rel pemandu *stage-y* (11). Pembawa *probe* harus berukuran lebih panjang

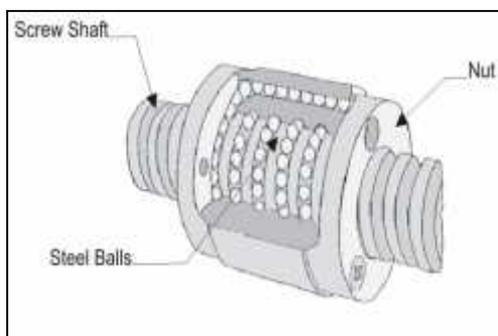
diameter pole magnet siklotron yaitu 960 mm. Lebar pembawa harus dapat memuat ukuran dari probe (14x5x2 mm) dan ketebalannya harus dapat mencegah kemungkinan melengkung. Untuk maksud tersebut, ukuran panjang, lebar dan ketebalan dari pembawa tersebut berturut-turut adalah 2000, 100 dan 30 mm, terbuat dari bahan pertineks. Pada titik tengah (pusat mekanik) Pembawa dibuat *pinhole* (10) untuk keperluan kesimetrian dan kelurusan. Ada dua lekukan persegi pada Pembawa (*carrier*) *Hall probe*. Karena jarak di antara *hill* kutub magnet siklotron nantinya hanya 40 mm, sehingga hanya tersedia jarak 5 mm masing-masing di atas dan di bawah pembawa. Oleh karena itu kedalaman lekukan harus sama dengan ketebalan *Hall probe* agar penempatan tersebut dapat rata dengan permukaan pembawa. Untuk memenuhi jangkauan pengukuran y hingga 960 mm maka jarak diantara *pinhole* (10) dan titik tengah *probe* (9) adalah 240 mm.

Hasil Penentuan Spesifikasi Komponen

Dari komponen-komponen penyusun perangkat mekanik, ada dua komponen utama yang penting untuk ditentukan spesifikasinya secara khusus, yaitu *ball screw* dan motor *stepper* penggerak.

1. Ball Screw

Ball screw merupakan perangkat mekanik yang berfungsi mengubah gerak rotasi menjadi gerak linier.



Gambar 2. Bagian utama *ball screw*.

Sebuah poros berulir menyediakan alur heliks untuk bantalan bola yang bertindak sebagai ulir presisi, serta mampu menahan beban dorong tinggi. *Ball screw* sangat diperlukan sebagai pemandu (*guide*), pendukung (*support*), posisi (*locate*), pemindah komponen dan produk secara akurat dalam suatu aplikasi otomasi.

Ball screw yang digunakan dalam rancangan alat pemetaan medan magnet adalah *precision ballscrew* produk standar Jepang yang mempunyai grade C5, dimana grade C5 merupakan klasifikasi yang sesuai untuk *measuring unit* dengan tingkat kepresisian yang sangat tinggi.

Panjang area pengukuran untuk sumbu y adalah 480 mm (2 x 240 mm) maka harus dipilih suatu *ball screw* yang panjang efektifnya lebih besar dari 480 mm.

Untuk memenuhi keperluan tersebut, *ball screw* penggerak sumbu y dipilih tipe BSS 1505-790-MC21 dengan spesifikasi :

pitch ball screw = 5 mm; diameter poros = 15 mm; panjang total = 790 mm; panjang efektif ulir = 718 mm; *basic load rating* = C (*dynamic*) 6,9 kN dan C_0 (*static*) 12,5 kN; material = SCM415 *carburized* 58~62 HRC.

Dari spesifikasi tersebut diatas, diketahui setiap satu putaran (360°) *ball screw* diperoleh gerak translasi 5 mm (*pitch*), dengan panjang efektif ulir *ball screw* penggerak sumbu y adalah 718 mm. Jika panjang blok rel pemandu sebagai dudukan meja kerja adalah 150 mm maka sisa panjang efektif ulir *ball screw* penggerak sumbu y adalah 568 mm (2 x 284 mm). Sehingga spesifikasi tersebut telah memenuhi (568 mm > 480 mm).

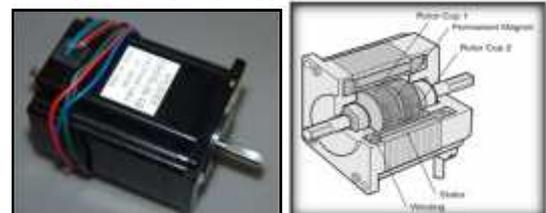
Panjang area pengukuran untuk sumbu x adalah 960 mm (2 x 480 mm) maka harus dipilih suatu *ball screw* yang panjang efektifnya lebih besar dari 960 mm. Untuk memenuhi keperluan tersebut, *ball screw* penggerak sumbu x dipilih tipe BSS 2010-1350-MC21 dengan spesifikasi :

pitch ball screw = 10 mm; diameter poros = 20 mm; panjang total = 1350 mm; panjang efektif = 1255 mm; *basic load rating* = C (*dynamic*) 6,9 kN dan C_0 (*static*) 12,5 kN; material = SCM415 *carburized* 58~62 HRC.

Dari spesifikasi diatas, diketahui setiap satu putaran (360°) *ballscrew* diperoleh gerak translasi 10 mm (*pitch*), dengan panjang efektif ulir *ball screw* penggerak sumbu x adalah 1255 mm. Jika panjang blok rel pemandu sebagai dudukan meja kerja adalah 135 mm maka sisa panjang efektif ulir *ball screw* penggerak sumbu x adalah 1240 mm (2 x 620 mm). Sehingga spesifikasi tersebut telah memenuhi (1240 mm > 960 mm).

2. Motor Stepper

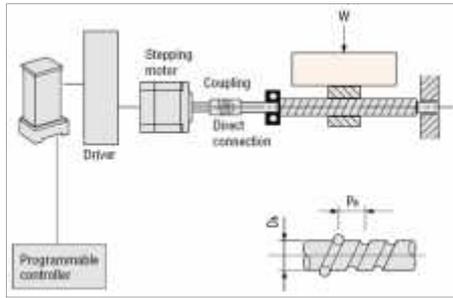
Motor *stepper* adalah perangkat elektro mekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronik menjadi gerakan mekanis diskrit. Motor *stepper* bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan kepada motor. Karena itu, untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor *stepper* yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik. Penggunaan motor *stepper* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan penggunaan motor DC biasa.



Gambar 3. Motor *stepper*

Pada rancangbangun ini mekanisme pergerakan sumbu x maupun sumbu y menggunakan sistem *ball*

screw yang dikopel secara langsung dengan motor stepper.



Gambar 4. Mekanisme pergerakan dengan sistem ball screw.

A. Mekanisme Gerak Sumbu Y

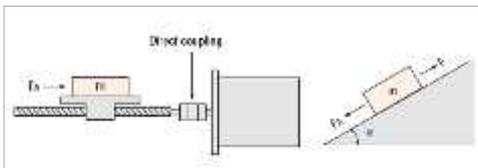
1. Parameter dan spesifikasi yang diperlukan

Beban kerja total (m) = 16 kg; koefisien gesek permukaan geser *linier guide* (μ) = 0.024; efisiensi *ballscrew* (η) = 0.9; koefisien gesek *pilot pressure nut* (μ_0) = 0.3; Diameter poros *ball screw* (D_B) = 15 mm; Panjang total *ballscrew* (L_B) = 790 mm; massa jenis bahan (*density of iron*) *ballscrew* (ρ) = 7900 kg/m³; *pitch of ball screw* (P_B) = 5 mm; panjang langkah (l) = 480 mm.

2. Perhitungan torsi yang diperlukan (T_M) [N.m]

(a) Perhitungan torsi beban (T_L) [N.m]

Torsi beban adalah tahanan gesek yang dihasilkan oleh bagian-bagian dari mekanisme gerak yang bersentuhan satu sama lain. Torsi ini terus diperlukan bila motor beroperasi. Torsi beban bervariasi sesuai dengan jenis mekanisme gerak dan massa kerja.



Gambar 5. Mekanisme pemindahan beban menggunakan ball screw.

Dari data parameter pada A.1, maka hasil perhitungannya adalah sebagai berikut :

a.1. Beban Pada Poros (F)

$$F = F_A + mg(\sin \theta + \mu \cos \theta) = 3,67 \text{ N}$$

Tabel 2. Koefisien Gesek *Linier Guide*

Types	Dynamic Friction Coefficient (μ)
Miniature Linear Guides	0.004~0.006
Medium Load Linear Guides	0.002~0.003

a.2. Gaya tekan pada pilot (F_0)

$$F_0 = \frac{F [N]}{3} = 1,25 \text{ N}$$

a.3. Torsi beban (T_L)

$$T_L = \left(\frac{FP_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 P_B}{2\pi} \right) \times \frac{1}{l} = 3,63 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

(b) Total kebutuhan torsi (T_M) [Nm]

$$T_M = T_L \times \text{safety factor} = 1,09 \times 10^{-2} \text{ Nm}$$

Tabel 3. Faktor keamanan beban statis

Condition of Use	Lower Limit of (f_s)
For normal operating condition	1~2
When smooth running performance is required	2~4
When vibrations and impact exist	3~5

Dari hasil perhitungan diketahui torsi yang dibutuhkan untuk penggerak sumbu y sebesar $1,09 \times 10^{-2} \text{ Nm}$. Dalam rancangbangun ini telah disediakan motor *stepper* tipe NEMA 23 NI 780084-01 dengan spesifikasi :

- Holding torque : 2.68 Nm $\pm 10\%$
- Rate current : 3 A/phase
- Resistance : 1.23 ohm/phase $\pm 10\%$
- Rotor inertia : $248 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$
- Motor weight : 1 kg
- Motor length : 77.7 mm

Dari spesifikasi tersebut telah memenuhi kebutuhan desain.

B. Mekanisme Gerak Sumbu Y

1. Parameter dan spesifikasi yang diperlukan
Beban kerja total (m) = 54 kg; koefisien gesek permukaan geser *linier guide* (μ) = 0.024; efisiensi *ballscrew* (η) = 0.9; koefisien gesek *pilot pressure nut* (μ_0) = 0.3; diameter poros *ball screw* (D_B) = 20 mm; Panjang total *ball screw* (L_B) = 1350 mm; massa jenis bahan (*density of iron*) *ball screw* (ρ) = 7900 kg/m³; *pitch of ball screw* (P_B) = 10 mm; panjang langkah (l) = 960 mm.

2. Perhitungan Torsi yang Diperlukan (T_M) [N.m]

(a) Perhitungan torsi beban (T_L) [N.m]

a.1. Beban Pada Poros (F)

$$F = F_A + mg(\sin \theta + \mu \cos \theta) = 12,7 \text{ N}$$

a.2. Gaya tekan pada pilot (F_0)

$$F_0 = \frac{F [N]}{4} = 4,2 \text{ N}$$

a.3. Torsi beban (T_L)

$$T_L = \left(\frac{FP_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 P h}{2\pi} \right) \times \frac{1}{l} = 2,43 \times 10^{-2} \text{ N}$$

(b) Total kebutuhan torsi (T_M) [Nm]

$$T_M = T_L \times \text{safety factor} = 7,29 \times 10^{-2} \text{ Nm}$$

Dari hasil perhitungan diketahui torsi yang dibutuhkan untuk penggerak sumbu x sebesar $7,29 \times 10^{-2}$ N sehingga masing – masing motor pada penggerak sumbu x dibebani torsi sebesar $3,65 \times 10^{-2}$ N. Dalam rancangbangun ini, sebagai penggerak untuk masing-masing sumbu x telah disediakan motor *stepper* tipe NEMA 23 NI 780084-01 dengan spesifikasi:

- *Holding torque* : $2.68 \text{ Nm} \pm 10\%$
- *Rate current* : 3 A/phase
- *Resistance* : $1.23 \text{ ohm/phase} \pm 10\%$
- *Rotor inertia* : $248 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$
- *Motor weight* : 1 kg
- *Motor length* : 77.7 mm

Dari spesifikasi tersebut telah memenuhi kebutuhan desain.

Hasil Konstruksi Dan Pengujian

Konstruksi perangkat mekanik pemetaan medan magnet ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Konstruksi perangkat mekanik pemetaan medan magnet

Dari hasil pengujian yang dilakukan, pergerakan perangkat mekanik telah dapat bekerja sesuai dengan program SIK yang telah dibuat. Dengan kecepatan 10 mm/s dapat memenuhi target atau luasan dari pemetaan medan magnet yang diinginkan yaitu arah $y = 480$ mm dan arah $x = 960$ mm memerlukan waktu ± 45 menit. Sensor (*hall probe*) yang terpasang (rata permukaan) pada *hall probe carrier* dapat bekerja mengikuti pergerakan arah y dan arah x dan nilai medan magnet yang terukur tertampil pada teslameter.

KESIMPULAN

Sistem perangkat untuk pemetaan medan magnet yang telah dibuat menggunakan dua *Hall-probe* yang

diletakkan pada suatu *probe-carrier*. Metode pengukuran dan akuisisi datanya dengan metode *flying mode*. Luasan yang dapat dijangkau dalam pemetaan sebesar 960 mm \times 960 mm. Ukuran spasi pengukuran untuk sumbu $y = 1$ mm dan untuk sumbu $x = 10$ mm. Waktu yang diperlukan untuk keseluruhan proses *mapping* adalah 45 menit.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dokumen Perhitungan Detil Perancangan Siklotron Proton 13 MeV untuk Produksi Radioisotop, PTAPB-BATAN, 2011
2. J. YOUNG, *Magnetic Field Measurement System for Cychu-10*, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada
3. KH. PARK et.al, Proceedings of EPAC 2004 *Precision Field Mapping System for Cyclotron Magnet*, Lucerne, Switzerland.
4. K.H. PARK, Y.G. Jung, D.E. Kim, B.K. Kang, M. Yoon, J.S. Chai, Y.S. Kim, *Field Mapping System for Cyclotron Magnet*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 545 (2005) 533–541.
5. Oriental Motor General Catalogue. 2009/2010. *Selecting a Stepping Motor*. Page B.24-37. Diakses Januari 2012.
6. "PET scan" peralatan canggih dan mutakhir dalam penentuan stadium kanker", Info BATAN 9 Oktober 2011, www.batan.go.id
7. S. H. SHIN and M. Yoon, E.-S. Kim and K. H. Park, J. S. Chai, *Measurement and Analysis of a 13 MeV Cyclotron Magnetic Field*, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 45, No. 4, October 2004, pp. 1045~1051.
8. T. SETIAWAN, *The Power of PET/CT in Oncology*, Oktober 2009, Prosiding PPI Teknologi dan Aplikasi Akselerator volume 11, , PTAPB BATAN.

TANYA JAWAB

Yunanto

- Mengapa pergeseran probe 48 cm?
- Mengapa diameter pole magnet 96 cm?

Kurnia Wibowo

- Pergerakan probe untuk sumbu Y sebesar 48 cm dikarenakan, pengukuran medan magnet tersebut menggunakan 2 buah hall probe/sensor, sehingga untuk mengukur medan magnet pada pole dengan diameter 96 cm, pergerakan sumbu Y sebesar 48 cm sudah mencukupi. Diameter pole magnet 96 cm dikarenakan desain siklotron DECY 13 mengacu pada desain KIRAMS 13.