

PERSIAPAN DAN PROSEDUR *PRE-COMMISSIONING* SIKLOTRON DECY-13

Silakhuddin

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN
Jalan Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281
email: silakh@batan.go.id

ABSTRAK

PERSIAPAN DAN PROSEDUR PRE-COMMISSIONING SIKLOTRON DECY-13. Persiapan dan prosedur untuk pre-commissioning Siklotron DECY-13 telah dibahas dan langkah-langkah yang akan dilakukan telah disusun. Pre-commissioning adalah merupakan tahapan pengujian sub-subsistem individual setelah semuanya terintegrasi di dalam subsistem siklotron. Pembahasan diambil dari acuan-acuan yang diperoleh dari pustaka, selanjutnya dikaji tentang kesiapan perangkat yang dapat digunakan, dan dari langkah-langkah tersebut kemudian disusun persiapan dan prosedur pre-commissioning. Hasil dari pembahasan ini adalah bahwa untuk melakukan pre-commissioning pada siklotron DECY-13 masih memerlukan penyelesaian subsistem rf-dee dan beberapa komponen pengujian masih harus dilengkapi.

Kata kunci: siklotron, pre-commissioning, persiapan, prosedur

ABSTRACT

PREPARATION AND PROCEDURES OF PRE-COMMISSIONING ON DECY-13 CYCLOTRON. A preparation and procedures for pre-commissioning of DECY-13 Cyclotron have been discussed and the steps for these have been arranged. Pre-commissioning is a testing stage of individual subsystems when all subsystems have been integrated into a cyclotron system. The discussion was taken from references, the next the readiness of devices was studied and then the preparation and procedures of the pre-commissioning were arranged. The results of the discussion are that for doing the pre-commissioning of the cyclotron DECY-13 still requires the completion of rf-dee subsystem and some components for testing are still to be completed.

Keywords: cyclotron, pre-commissioning, preparation, procedure

PENDAHULUAN

Kegiatan suatu rancangbangun sistem perangkat besar akan berakhir dengan tahapan *commissioning* yang bermakna berupa kegiatan pengujian tahap akhir dari serial rangkaian proses rancangbangun. Sebelum *commissioning* diperlukan tahapan *pre-commissioning* yaitu sebuah tahapan yang bertujuan untuk memastikan bahwa individual subsistem yang telah selesai dalam tahap rancangbangun dan terintegrasi ke dalam sistem dapat bekerja dengan baik sesuai spesifikasi yang sudah dirancang sebelumnya. Kegiatan tersebut meliputi uji fungsi individual subsistem setelah tahapan konstruksi dan integrasi dinyatakan selesai [1]. Sedangkan tahapan *commissioning* pada siklotron adalah *commissioning* pada uji berkas ion [2, 3]. Pustaka lain menyebutkan juga bahwa tahapan uji pada subsistem siklotron misalnya tahapan uji pada subsistem RF disebutkan sebagai *commissioning* pada subsistem tersebut [4, 5]. Pada bahasan ini kegiatan pengujian pada sub-subsistem setelah selesai integrasi sub-subsistem, sebagai *pre-commissioning* sistem, dalam hal ini sistem siklotron DECY-13.

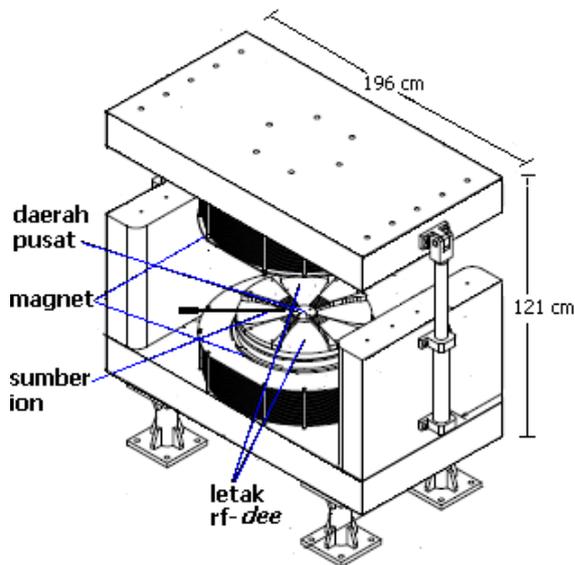
Siklotron DECY-13 akan merupakan suatu mesin hasil litbang rancangbangun yang rencananya akan dilakukan *commissioning* paling lambat pada

tahun 2019, yang rencana sarannya dapat menghasilkan berkas proton berenergi 13 MeV dan arusnya sebesar 50 μ A [6]. Dalam rangka mempersiapkan *commissioning* tersebut diperlukan suatu dokumen tentang *pre-commissioning* yang mencakup metode yang akan diterapkan dan perangkat yang seharusnya tersedia. Untuk maksud tersebut maka akan dibahas tentang persiapan *pre-commissioning* pada sub sistem siklotron dan selanjutnya dirumuskan prosedur untuk melaksanakannya yang disesuaikan dengan status kesiapan subsistem dan perangkat pengujianya. Dari hasil bahasan ini akan dapat ditentukan perencanaan tahapan berikutnya untuk mencapai kondisi siap *commissioning* yang diharapkan terjadi tepat pada waktunya dengan spesifikasi mesin siklotron yang sesuai sasaran.

TATA KERJA

Obyek Pembahasan: Sistem Siklotron DECY-13

Arsitektur Siklotron DECY-13 ditunjukkan pada Gambar 1 [7], di sini hanya diperlihatkan empat sub-subsistem utama yaitu daerah pusat, sumber ion, magnet dan rf-dee.



Gambar 1. Arsitektur Siklotron DECY-13

Spesifikasi sesuai dengan desain adalah sumber ion jenis *Penning* yang mampu menghasilkan arus berkas 100 μA di daerah pusat, kekuatan medan magnet di daerah pusat 1,275 T, tegangan puncak *dee* 40 kV dengan frekuensi 78 MHz, energi proton pada radius maksimum 13 MeV, dan arus berkas proton pada radius terluar yang diarahkan ke target sebesar 50 μA .

Ruang Lingkup Pembahasan

Prosedur *pre-commissioning* dikaji berdasarkan acuan-acuan yang ada. Pada setiap prosedur akan dibahas dengan mengkaji ketersediaan alat di laboratorium lokal dan kemudahan dalam mendapatkan peralatan.

Setelah diperoleh rumusan prosedur *pre-commissioning*, akan ditinjau status yang telah dicapai saat ini untuk melakukan tahapan persiapan *pre-commissioning*, yang selanjutnya dirumuskan prosedur tahapan *pre-commissioning*. Semua tahapan yang akan dirumuskan tersebut dengan kondisi prasyarat kevakuman di *vacuum chamber* sudah terpenuhi. Hasil perhitungan sebelumnya telah menunjukkan bahwa kondisi tersebut dapat dicapai pada tingkat kevakuman minimum setelah gas masuk sebesar 1×10^{-6} Torr [8]. Hasil uji kevakuman dari *vacuum chamber* siklotron DECY-13 menunjukkan bahwa kondisi kevakumannya sudah terpenuhi.

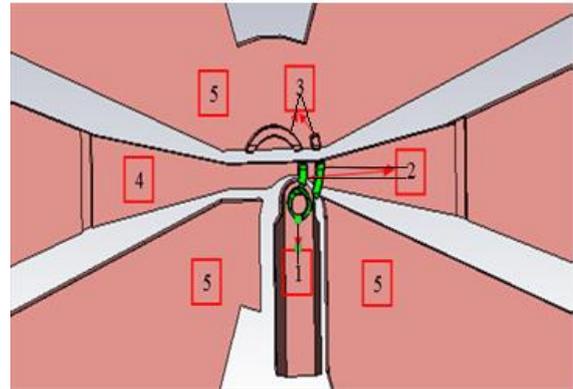
Obyek dari *pre-commissioning* dibatasi pada komponen-komponen spesifik siklotron yaitu sub-subsistem daerah pusat siklotron (*cyclotron central region*), subsistem sumber ion, subsistem magnet dan dan subsistem *rf-dee*. Sub-subsistem penting lainnya misalnya vakum, pendingin, catu daya listrik dan perangkat kendali-monitor tidak menjadi obyek

bahasan karena sub-subsistem tersebut sudah cukup populer menjadi obyek bahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Daerah Pusat

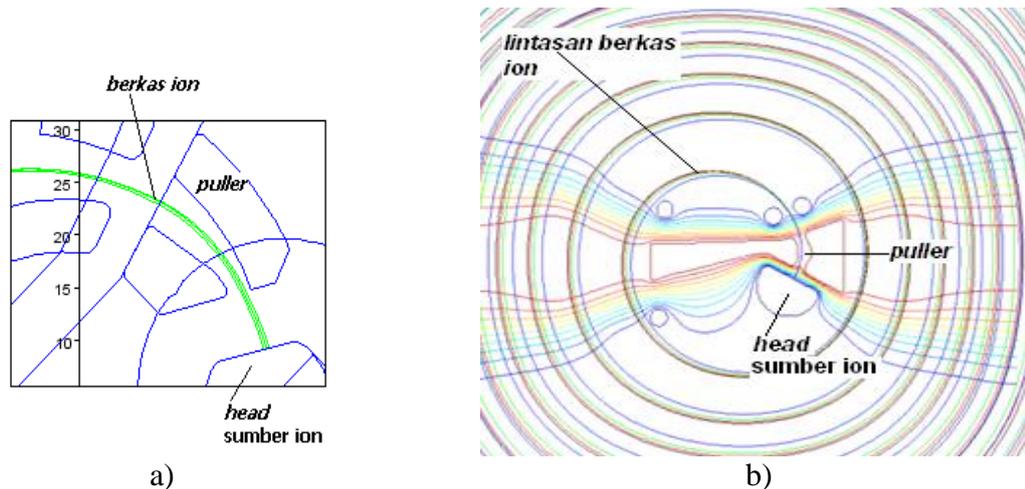
Di daerah pusat siklotron terdiri atas komponen-komponen *head* sumber ion, *puller*, bagian pusat *dee*, *dummy dee* dan bagian pusat *liner*. Skema dari daerah pusat ditunjukkan seperti Gambar 2 [9].



Gambar 2. Komponen-komponen pada daerah pusat siklotron, terdiri atas 1) *head* sumber ion, 2) *puller*, 3) *dummy dee*, 4) bagian pusat dari *dee*, 5) bagian pusat *liner*.

Daerah pusat akan paling menentukan karakteristik dari berkas ion yang dihasilkan dalam siklotron [10], sehingga perlu diinvestigasi desainnya. Investigasi ini untuk melihat fungsi konfigurasi dan geometri dari komponen-komponen di daerah pusat yang dapat mengekstrak berkas ion dari *head* sumber ion dan menghasilkan beberapa putaran awal dari berkas tersebut secara sempurna. Investigasi daerah pusat dilakukan dengan dua metode, yaitu metode simulasi dan metode uji berkas ion pada energi beberapa MeV [3]. Metode uji berkas dilakukan juga untuk menguji fungsi sumber ion dalam menghasilkan berkas ion.

Investigasi ini dilakukan dengan mensimulasi dinamika atau lintasan awal berkas ion setelah keluar dari *head* sumber ion. Untuk melakukan simulasi digunakan program pelacak berkas (*beam tracking*). Konfigurasi dan geometri dari komponen-komponen di daerah pusat akan dinilai tepat jika hasil simulasi dinamika berkas lolos ekstraksi dan tidak terjadi tumbukan antar lintasan karena di daerah central region. Pada Gambar 3 diperlihatkan contoh dari hasil simulasi lintasan berkas yang memenuhi kriteria tersebut, pada Gambar 3 a) ditunjukkan berkas ion yang baru saja terekstraksi dari sumber ion [11] dan pada Gambar 3 b) diperlihatkan berkas ion setelah mengalami beberapa putaran [12].



Gambar 3. Contoh lintasan berkas partikel yang tepat; tidak terjadi tumbukan antar lintasan

Pada siklotron DECY-13, konstruksi dari komponen-komponen di daerah pusat masih dalam tahap selesai desain geometri dan konfigurasi. Geometri dari komponen-komponen di daerah pusat sudah tetap (tak dapat dirubah) maka yang akan dilakukan adalah mensimulasikan ekstraksi dan gerakan berkas pada daerah pusat tersebut dan mencari posisi terbaik dari *head* sumber ion relatif terhadap *puller*. Simulasi dilakukan menggunakan program komputer pelacak berkas (*beam tracking*) yang ditulis dalam Scilab 5.4.1 yang telah dikembangkan oleh grup simulasi di Bidang Fisika Partikel PSTA Batan. Program ini telah divalidasi dengan cara membandingkan dengan program *pWheel* yang dikembangkan oleh grup KIRAMS untuk menghitung lintasan berkas pada siklotron KIRAMS-13 [13]. Untuk menjalankan program simulasi ini, medan magnet dan medan listrik di daerah pusat dikalkulasi secara numerik menggunakan perangkat lunak Opera3D modul Tosca.

Pengujian Sumber Ion Di Daerah Pusat

Pengujian sumber ion di daerah pusat siklotron ini dilakukan setelah pengujian di perangkat uji khusus diluar siklotron dilakukan. Pengujian dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama untuk menguji kemampuan optimum sumber ion dalam menghasilkan berkas ion. Pada tahapan ini diperlukan fungsi magnet tetapi belum memerlukan operasi subsistem *rf-dee*. Tegangan *puller* dicatu dengan tegangan tinggi DC beberapa puluh kV dan berkas ion diukur dengan *fixed beam probe* yaitu pengukur arus pada posisi tetap di ujung kanal *puller*. Tahap kedua adalah untuk menguji kemampuan menghasilkan arus berkas ion setelah beberapa putaran berkas ion, yang juga untuk menguji geometri dan konfigurasi daerah pusat. Pada tahapan ini sudah diperlukan pengoperasian subsistem *rf-dee*.

Untuk melakukan pengujian ini diperlukan pengukur arus berkas ion yang dapat dipindah posisi radialnya atau *movable beam probe*.

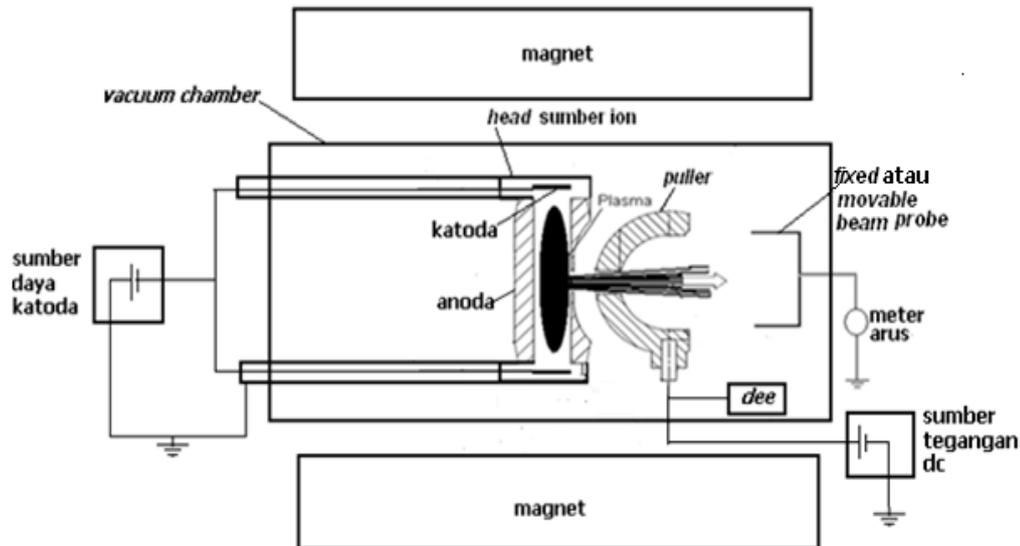
Tahapan pengujian berkas ion dilakukan pada nilai arus berkas sekecil mungkin untuk menjaga kondisi siklotron dan membatasi paparan radiasi [14].

Pada sistem siklotron DECY-13 sudah selesai konstruksi magnet, *vacuum chamber* siklotron dan sumber ion, akan tetapi subsistem *rf-dee* masih dalam tahap pengadaan komponen. Pengujian yang segera dapat dilakukan adalah pengujian tahap pertama yaitu menguji kemampuan sumber ion dalam menghasilkan berkas ion menggunakan *puller* bertegangan DC yang dicatu dari luar. Skema dari pengujian dari sumber ion yang akan dilakukan ditunjukkan pada Gambar 4.

Untuk melakukan pengujian ini diperlukan kondisi kevakuman sudah mencapai sekitar $1-2 \times 10^{-6}$ Torr sehingga bila aliran gas hidrogen 5 sccm yang masuk untuk membentuk ion-ion H⁺ kevakumannya sekitar $7-8 \times 10^{-6}$ Torr [15]. Magnet harus sudah beroperasi dengan kuat medan magnet antara 0,4 hingga 0,88 T [16, 17].

Pengujian tahap kedua akan dilakukan dengan kondisi magnet beroperasi pada kuat medan optimum yaitu 1,275 T di daerah pusat sesuai spesifikasi DECY-13. Subsistem *rf-dee* perlu beroperasi dengan tegangan puncak 40 kV dan frekuensi 78 MHz, tegangan *puller* menggunakan tegangan *dee* dan pengukuran arusnya menggunakan *movable beam probe*.

Untuk melaksanakan pengujian tahap pertama maupun kedua masih perlu konstruksi dan instalasi *fixed beam probe* dan *movable beam probe*. Karena operasi berkas ion berpotensi menghasilkan paparan radiasi maka detektor-detektor radiasi gamma akan disiapkan.



Gambar 4. Skema pengujian sumber ion di daerah pusat siklotron.

Pengujian Fungsi Magnet

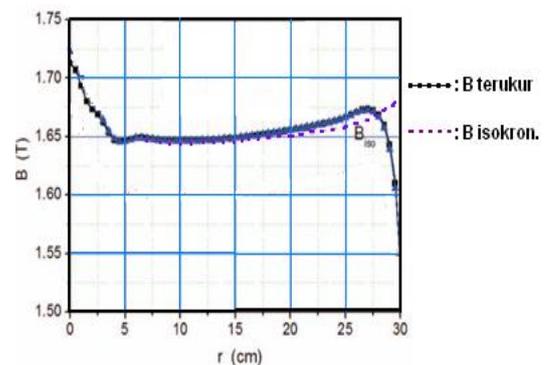
Fungsi utama medan magnet adalah untuk membuat gerak berkas ion berbentuk siklik dalam proses pemercepatan, selain itu juga berguna untuk membentuk ionisasi yang kuat di dalam sumber ion jenis *Penning* di dalam siklotron ini. Ionisasi di dalam sumber ion jenis ini dimungkinkan terjadi pada medan magnet beberapa kilogauss [16-18]. Selain besarnya medan magnet, permasalahan yang dihadapi dalam konstruksi magnet siklotron adalah pola medan magnet yang harus memenuhi kriteria isokronus dan fungsi *focussing* sebagaimana yang sudah dirancang. Selisih yang besar antara medan magnet real dengan medan magnet isokronus akan menyebabkan beda fase partikel dengan fase *rf* pemercepatan oleh *dee*, yang mana bila beda fase kumulatif (untuk semua radius) begitu besar menjadikan energi pemercepatan kurang efisien. Beda fase tersebut bila mengacu siklotron 13 MeV nilai yang layak maksimum sebesar 15^0 [19].

Pengujian magnet terdiri atas dua tahapan, pertama pengujian pola medan magnet dan kedua pengujian fungsi. Pengujian tahap pertama dilakukan sebelum integrasi sub-subsistem siklotron yaitu dengan cara pengukuran secara nyata besarnya medan magnet di banyak titik yang disebut pemetaan (*mapping*) medan magnet. Sedangkan pengujian fungsi magnet dalam kemampuan menghasilkan putaran berkas partikel dengan benar baru dapat dilakukan ketika sub-subsistem lainnya sudah terintegrasi dan siap fungsi di dalam sistem siklotron.

Pengujian pola medan magnet memerlukan suatu fasilitas perangkat pemetaan medan magnet. Suatu perangkat pemetaan koordinat kartesian perlu tersedia untuk maksud tersebut. Data dari pemetaan selanjutnya dihitung rata-rata azimuthal pada suatu

titik radius dan diperiksa kesesuaiannya dengan pola radial yang isokronus. Jika belum sesuai maka perlu proses *shimming* yaitu pengerjaan *machining* pada bagian pinggir *hill* dari kutub magnet secara simetri dan akurat. Pada Gambar 4 diperlihatkan contoh antara medan magnet rata-rata secara azimuthal sebagai fungsi radius, yang merupakan hasil dari pemetaan [20].

Pada Siklotron DECY-13 pengujian pola magnet magnet telah dilakukan dengan melakukan pemetaan medan magnet pada titik-titik di antara kutub-kutub magnet dengan menggunakan perangkat pengukuran medan magnet ini berupa alat pemetaan medan magnet hasil rekayasa sendiri [21].



Gambar 5. Contoh medan magnet hasil pengukuran dan medan magnet isokronus

Hasil pengolahan data pemetaan menunjukkan bahwa kuat medan magnetnya di daerah pusat (B_0) sebesar 1,275 T dan rata-rata untuk radius-radius berikutnya memenuhi syarat isokronus. Beda fase kumulatif dari partikel relatif terhadap fase *rf* adalah sebesar 15^0 . Hasil ini tidak berbeda dengan beda fase pada siklotron 13 MeV di Korea Cancer Center

Hospital (KCCH) yang merupakan acuan utama dari desain siklotron DECY-13 [19]. Pada fasilitas siklotron MH-18 di NIRS Jepang terdapat beda fase sekitar 18° saat sebelum dilakukan optimasi dan hanya beberapa derajat setelah optimasi [22]. Dengan demikian untuk tahap awal, beda fase 15° yang diperoleh pada magnet DECY-13 sementara dianggap memadai, walaupun selanjutnya optimasi medan magnet menjadi pertimbangan untuk memperoleh beda fase sekecil mungkin.

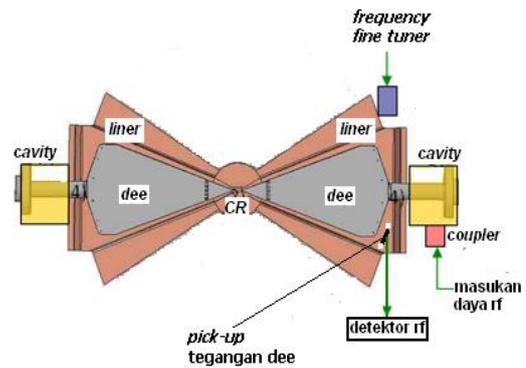
Pengujian subsistem magnet dalam rangka *pre-commissioning* DECY-13 baru akan dapat dilakukan setelah subsistem rf-dee terpasang dan berfungsi. Pengujiannya dilakukan dengan melihat keberhasilan terdeteksi berkas ion yang pada putaran awal di daerah pusat. Pengujian lebih lanjut dilakukan dengan mengamati prosentase transmisi berkas ion yaitu perbandingan arus berkas ion pada daerah radius terluar dengan arus berkas di daerah pusat. Transmisi yang lebih besar dari 60% mengindikasikan sistem magnet berfungsi dengan benar. Untuk mendeteksi arus bekas ion perlu pemasangan *movable beam probe*.

Pengujian Fungsi Subsistem Rf-Dee

Dua besaran yang diuji dalam subsistem rf-dee adalah nilai frekuensi dan tegangan puncak pada dee. Pengukuran frekuensi tidak banyak kendala karena cara pengukuran yang umum sudah cukup dikenal. Yang perlu perlakuan spesifik adalah pengukuran tegangan dee pada frekuensi sekitar 78 MHz dan nilai tegangan yang hendak dikur sekitar 40 kV.

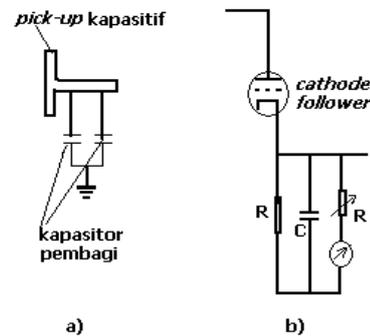
Metode pengukuran tegangan puncak dee secara konvensional dapat dilakukan menggunakan *probe* tegangan tinggi yang dilekatkan pada tangkai dee. Metode lainnya adalah dengan mengukur spektrum sinar x yang dipancarkan dari tangki siklotron yang berasal dari elektron yang mengalami percepatan di antara dee dan liner [23]. Metode ini memerlukan perangkat analisis sinar x di dekat fasilitas siklotron. Pada fasilitas Rutger Cyclotron di Rutger University USA dengan cara melekatkan langsung *probe* resistor pembagi tegangan tinggi pada tangkai dee, dan voltmernya dengan Tektronix P6015, tetapi dikombinasikan juga dengan antena penangkap rf untuk mengukur tegangan [24]. Instalasi siklotron dengan kontrol sistem rf yang maju menggunakan sistem *Low Level RF Control* (LLRF) yang mana digunakan komponen penangkap tegangan rf dee [25, 26].

Pengujian subsistem rf-dee pada DECY-13 akan dilakukan dengan memasang suatu *capacitive pick-up* di dekat dee yang kemudian dihubungkan dengan suatu detektor tegangan. Dengan menggunakan gambar rancangan dari subsistem rf-dee, skema pengujian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema pengukuran tegangan dee menggunakan *pick-up* tegangan dee

Skema dari *pick-up* tegangan dee dan detektor rf diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema dari a): *pick-up* tegangan dee dan b): detektor rf

Sebelum pengujian pada kondisi vakum, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi pada kondisi non vakum dengan kalibrator suatu voltmeter tegangan tinggi dan frekuensi tinggi, misalnya voltmeter Tektronix 6015A. Untuk pengujian frekuensi rf-dee prinsipnya hampir sama hanya detektor rf nya adalah detektor fase.

KESIMPULAN

Persiapan untuk melakukan pengujian sub-subsistem pada siklotron DECY-13 telah dibahas dan prosedur untuk melakukan telah disusun. Pengujian daerah pusat akan dilakukan dengan mensimulasikan ekstraksi dan gerakan berkas pada daerah pusat tersebut dan mencari posisi terbaik dari *head* sumber ion relatif terhadap *puller*. Suatu program simulasi sudah tersedia untuk melakukan pengujian tersebut. Sumber ion akan diuji di daerah pusat siklotron yang masih memerlukan kesiapan operasi subsistem rf-dee dan konstruksi *beam probe* baik untuk posisi *fixed* maupun *movable*. Subsistem magnet telah dikarakterisasi dan telah memenuhi fungsi isokronus, tetapi fungsi dalam kemampuannya memberikan lintasan putar pada berkas ion masih menunggu kesiapan subsistem rf-dee. Subsistem rf-dee yang masih dalam tahap konstruksi, akan diuji dengan perangkat *capacitive pick up* dan detektor rf, yang

dilakukan kalibrasi diluar sistem vakum menggunakan voltmeter tegangan tinggi/frekuensi tinggi. Secara umum, untuk melakukan *pre-commissioning* tersebut masih harus menunggu selesai konstruksi dari subsistem *rf-dee*. Beberapa komponen masih harus diadakan dan atau dikonstruksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulisan makalah ini dimungkinkan karena adanya kegiatan litbang rancangbangun Prototipe Siklotron Proton 13 MeV Untuk Produksi Radioisotop di PSTA BATAN Yogyakarta. Untuk itu ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala PSTA, Kepala Bidang Fisika Partikel dan Pemegang SIPL kegiatan litbang tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, *Pre-commissioning mechanical rotating*, <http://marinepowerplant.blogspot.co.id/2013/10/pre-commissioning-mechanical-rotating.html>, diakses 17 Juni 2016.
2. Rocken, H., Abdel-Bary, M., Akcoltekin, E. et al, *Progress at Varian's Superconducting Cyclotrons: A Base for The Probeam™ Platform*, Proceedings of Cyclotrons 2013, Vancouver, BC, Canada, 2013.
3. Jung, S.Y., Kim H.,W., Ghergherehchi, M., *Central Region of SKKUCY-9 Compact Cyclotron*, Journal of Instrumentation, Volume 9, April 2014, IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl, 2014.
4. Labrecque, F., Grillet, F., Milton, B.F., *Configurable 1 MeV Test Stand Cyclotron for High Intensity Injection System Development*. Proceedings of Cyclotrons2013, Vancouver, BC, Canada, 2013.
5. Yin, Z., Ji, B., Lei, Y. Li, P., *The Design and Commissioning of The RF System for CYCIAE-14 Cyclotron*, Proceedings of IPAC 2013, Shanghai, China, 2013.
6. Anonim, *Desain Dasar Siklotron Proton 13 MeV Untuk Produksi Radiosotop*, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN, 2010.
7. Silakhuddin, Sunardi Dan Mulyani, E., *Perhitungan Efek Tingkat Kevakuman Pada Beam Loss Di Dalam Tangki Siklotron*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216-3128, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Juli 2013.
8. Anonim, *Dokumen Desain Detil Siklotron Proton 13 MeV Untuk Produksi Radioisotop (DECY-13)*, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta, 2014.
9. Afkhami Karaei, M.M., Afarideh, H., Solhju, R., Azizpourian, S., *Investigation of Central Region Design of 10 MeV AVF Cyclotron*, Proceedings of IPAC 2016, Busan, Korea, 2016.
10. Oliver, C., et al., *Optimizing the radioisotope production with a weak focusing compact cyclotron*, Cyclotrons'2013, 2013.
11. Pramudita, A., E. Mulyani, E., And Kudus, I.A., *Simulations of Beam Quality in a 13 MeV PET Cyclotron*, Atom Indonesia Vol. 41 No. 3 (2015) 145 - 149
12. He, X., Yang, G., Zhang, K., Long, J., *Central Region Design of A Baby Cyclotron*, Proceedings of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China.
13. Anggraita, P., *Perhitungan Orbit Awal Berkas Proton Pada Central Region Siklotron*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol 13, PTAPB-BATAN, Yogyakarta Desember 2011
14. Podaderay, I., Ahedo, B., Arce, P., et al, *Beam Diagnostics For Commissioning And Operation of Novel Compact Cyclotron For Radioisotope Production*, Proceedings of IBIC2013, Oxford, UK, 2013.
15. Komunikasi pribadi dengan Dr. Jung In Su (KIRAMS), Workshop Prototip Siklotron PET, Serpong Tangerang, 21 April 2016.
16. J. Long, Z. Yang, P. Dong, K. Zhang (2013), *Study on A Cold-cathode H- PIG-type Ion Source*, Nuclear Science and Techniques, 24 (2013) 040201, 2013.
17. Y.H. Yeon, Kim, H.S., Gad, K.M., et al, *"Development Study of Penning Ion Source for Compact 9 MeV Cyclotron"*, Proceedings of Cyclotrons (2013), Vancouver, BC, Canada, 2013.
18. Yang, Z., Long, J.D., Dong, P., et al, Chinese Physics C (HEP & NP), **36** 10 p 1001. 2012.
19. Shin S.H., Yoon, M., *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, 2004.
20. Chen, D., Chen Z., Liu, K., *Magnetic Field Calculation For A 10 MeV Positron Emission Tomography Cyclotron*, Review of Scientific Instruments **84**, 053306 (2013).
21. Wibowo, K., Silakhuddin, Santosa, S., *Rancangbangun Perangkat Mekanik Pemetaan Medan Magnet Untuk Siklotron DECY-13*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216-3128, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Juni 2013.

22. Hojo, S., Sugiura, A., Katagiri, K., et al, *Present Status of Cyclotrons (NIRS-930, HM-18) at NIRS*, Proceedings of Cyclotrons2013, Vancouver, BC, Canada, 2013.
23. Timmer, J.H., Rocken, H., Komorowsky, P.A., *Dee Voltage Calibration for the Accel Proton Therapy Cyclotron*, Proceedings of ICAP 2006, Chamonix, France, 2006.
24. Anonim, *12 Inch Cyclotron Rf Test and Measurement*, <http://www.physics.rutgers.edu/cyclotron/12inchrftnm.shtml>, diakses 19 Oktober 2015.
25. Huang, J., Hu, T., Li, D., Liu, K., *Low Level RF Control System for Cyclotron 10 MeV*, Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, 2011.
26. Sharifi, M.S., Malafeh, A., Ghergherehchi, M., *Intelligent Low-level RF System by Non-destructive Beam Monitoring Device for Cyclotrons*, <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1504/1504.05282.pdf>, diakses 19 Oktober 2015.

TANYA JAWAB

Sudi Ariyanto

- Bagaimana memastikan lintasan ion sesuai yang diharapkan dan bisa mencapai titik keluar?
- Bagaimana menyiapkan bahan targetnya?

Silakhuddin

- Untuk memastikan bahwa lintasan ion sesuai yang diharapkan maka pada beberapa radius diukur arus ionnya dan presentase akselerasinya dipastikan tidak kurang dari $\approx 70\%$. Jika presentase tersebut kurang dari itu maka dilakukan tuning pada magnet dan posisi sumber ion. Pengukuran tersebut berlanjut hingga radius terluar yaitu radius ekstraksi.
- Target berupa $H_2^{18}O$ yang ditepatkan pada suatu wadah silinder dan posisi wadah tersebut terletak pada dinding vacuum chamber siklotron.