

# Desain Integrasi Sistem Instrumentasi dan Kendali untuk *Commissioning* Siklotron DECY-13

Frida Iswinning Diah<sup>1</sup>, Fajar Sidik Permana<sup>2</sup>, Emy Mulyani<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Pusat Riset Teknologi Akselerator – Organisasi Riset Tenaga Nuklir – Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Babarsari kotak pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281 INDONESIA (tel. 0274-488435, 464436; email: <sup>1</sup>frid002@brin.go.id, <sup>2</sup>faja018@brin.go.id, <sup>3</sup>emy.mulyani@brin.go.id)

[Diterima: 8 September 2022, Revisi: 2 Maret 2023]

Corresponding Author: Frida Iswinning Diah

**INTISARI** — Siklotron adalah alat akselerator berkas partikel yang digunakan untuk berbagai aplikasi, salah satunya yaitu sebagai penghasil radioisotop medis. Pada saat ini, Pusat Riset Teknologi Akselerator, Organisasi Riset Tenaga Nuklir - Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTA ORTN-BRIN) melakukan penelitian dan pengembangan (litbang) siklotron DECY-13 yang telah mencapai tahap pengujian komponen-komponen utamanya. Komponen utama siklotron DECY-13 terdiri atas sistem magnet, sistem generator frekuensi radio (*radio frequency*, RF), sistem sumber ion, sistem akselerator, sistem pendingin, sistem vakum, dan sistem deteksi berkas. Dalam rangka proses *commissioning*, perlu dilakukan penyusunan desain integrasi sistem instrumentasi dan kendali (SIK) yang menyatukan operasi seluruh komponen utama siklotron DECY-13 untuk menghasilkan berkas partikel sesuai dengan yang diharapkan. Proses integrasi dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama berupa penentuan prosedur operasi pada saat *commissioning* serta identifikasi parameter operasi, sedangkan tahap kedua berupa perancangan desain integrasi SIK. Proses identifikasi parameter dan penentuan prosedur operasi dilakukan dengan mempelajari data-data pengujian dan standar operasi masing-masing komponen, sehingga diperoleh parameter-parameter penting dalam operasi. Tahap selanjutnya adalah melakukan pengembangan arsitektur SIK dengan cara mengintegrasikan sistem operasi pada komponen utama menggunakan metode *distributed control system* (DCS). Metode ini dipilih karena fleksibilitasnya untuk pengembangan jangka panjang dan juga kemudahan dalam perawatan sistem di masa depan. Konfigurasi DCS yang dibuat terdiri atas tiga *layer*, yaitu *operator layer*, *main control layer*, dan *device layer*. Komunikasi antara *device layer* dengan *main control layer* dilakukan menggunakan komunikasi serial RS-232, sedangkan komunikasi antara *main control layer* dengan *operator layer* menggunakan Ethernet. Komunikasi RS-232 antara *device layer* dengan *main control layer* digunakan untuk mengatur proses akuisisi data, *data logging*, dan kendali operasi. Pada *operator layer* terdapat *host-PC* yang berfungsi untuk menampilkan data sekaligus melakukan *data logging*. Desain ini diharapkan dapat menjadi panduan dalam implementasi penyempurnaan SIK, sehingga kemudahan dalam proses *commissioning* dapat terwujud.

**KATA KUNCI** — Sistem Kendali, Integrasi, Siklotron, *Commissioning*.

## I. PENDAHULUAN

Siklotron adalah salah satu jenis alat akselerator (pemercepat) berkas partikel yang masih terus dikembangkan hingga saat ini untuk aplikasi yang luas. Salah satu aplikasinya adalah di bidang kesehatan, yaitu untuk produksi radioisotop medis yang berguna dalam diagnosis maupun terapi kanker. Pusat Riset Teknologi Akselerator - Organisasi Riset Tenaga Nuklir - Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTA-ORTN-BRIN) sedang mengembangkan prototipe siklotron 13 MeV, yaitu DECY-13, yang proses pengujian beberapa komponen utamanya telah selesai. Komponen utama pada siklotron terdiri atas tujuh sistem, yaitu sistem magnet, sistem generator frekuensi radio (*radio frequency*, RF), sistem sumber ion, sistem akselerator, sistem pendingin, sistem vakum, dan sistem deteksi berkas [1], [2]–[6]. Setiap komponen tersebut telah melalui proses pengujian, sehingga untuk menuju tahap akhir dari proses rancang bangun siklotron DECY-13, perlu dilakukan *commissioning*. Tahap ini juga biasa disebut dengan *beam commissioning* karena tujuan utamanya adalah pengoperasian siklotron secara penuh untuk menghasilkan berkas sesuai dengan desain yang telah dibuat [7].

Pada proses *commissioning*, salah satu tahap yang harus dilakukan adalah operasi siklotron secara menyeluruh, yang artinya semua komponen utama siklotron akan dioperasikan secara berurutan sesuai dengan standar operasi siklotron secara umum. Pada saat ini, pengoperasian siklotron DECY-13 belum dapat dilakukan secara efektif dan efisien karena posisi komponen-komponen utama yang berjauhan dan secara sistem kendali belum terintegrasi.

Selain itu, kompleksnya parameter operasi pada siklotron mempersulit operator dalam melakukan pengamatan dan pendokumentasian secara cermat, seperti yang telah dilakukan saat pengujian sistem sumber ion menggunakan tegangan *direct current* (DC) [3], [8]. Pada pengujian tersebut, diperlukan lebih dari tiga orang untuk melakukan pengamatan dan pencatatan karena sistem sumber ion terdiri atas beberapa subkomponen yang terpisah. Hal ini juga terjadi ketika dilakukan pengujian pada sistem generator RF dan sistem pemercepat [9]–[11].

Dari evaluasi beberapa komponen tersebut, perlu dilakukan peningkatan atau pengembangan sistem operasi yang terintegrasi untuk memudahkan operator dalam pengoperasian, pengamatan, dan pendokumentasian kejadian selama operasi [12]. Oleh karena itu, perencanaan integrasi sistem operasi sangat penting dilakukan, dengan fokus utamanya adalah mendukung kelancaran proses *commissioning*. Pada akhirnya, diharapkan karakteristik sistem dapat diperoleh secara tepat, terhindar dari kesalahan operasi, serta keselamatan alat dan personel terjamin.

Untuk mencapai tujuan, yaitu perancangan sistem instrumentasi dan kendali (SIK) untuk *commissioning* siklotron DECY-13, penulisan makalah ini dibagi ke dalam enam bagian dengan rincian sebagai berikut. Bagian I adalah pendahuluan, yang berisi latar belakang, permasalahan, tujuan, dan sistematika penulisan. Bagian II berisi metode perancangan yang digunakan. Selanjutnya, Bagian III menjelaskan tentang detail komponen utama siklotron DECY-13 dan Bagian IV menjelaskan proses desain yang dilakukan untuk selanjutnya

dilakukan pembahasan pada Bagian V. Sebagai penutup, Bagian VI berisi merupakan kesimpulan dari penulisan makalah ini.

## II. METODE PERANCANGAN

Akselerator merupakan sebuah sistem yang memiliki karakteristik kompleks. Secara sederhana, suatu perangkat akselerator dapat dibagi menjadi empat bagian, yaitu sumber partikel atau ion, sistem akselerator, sistem ekstraksi berkas, dan sistem transport berkas [13]. Pada dasarnya, penyusunan konsep suatu sistem kendali akan mengikuti perkembangan teknologi kendali yang dibuat di masanya. Untuk teknologi akselerator, *programmable logic controllers* (PLCs) serta perangkat lunak LabView dan EPICS merupakan sarana yang masih sering dipakai sampai saat ini untuk membangun suatu kendali sistem di akselerator [14]–[17].

Secara khusus, desain sistem kendali siklotron untuk penelitian berbeda dengan siklotron komersial di rumah sakit. Pada awal proses rancang bangunnya, beberapa siklotron untuk produksi radioisotop menggunakan metode *distributed control system* (DCS), di antaranya KIRAMS Korea dan CIAE China [18], [19]. Sementara itu, saat ini teknologi sistem kendali akselerator untuk penelitian di negara-negara maju lebih banyak berfokus ke proses *upgrade* sistem karena komponen dan perangkat lunak yang sudah tidak kompatibel dengan perkembangan teknologi saat ini [14], [16].

Sistem kendali komponen utama pada siklotron memiliki spesifikasi yang tidak seragam. Beberapa komponen sudah difasilitasi dengan komunikasi serial RS-232, tetapi ada juga yang masih menggunakan sistem analog, baik pada masukan ataupun keluarannya. Oleh karena itu, proses identifikasi sistem kendali pada masing-masing komponen utama dilakukan di awal proses desain dengan berdasar pada kondisi terkini siklotron DECY-13 dan referensi tentang sistem kendali akselerator, baik yang sudah lama maupun terkini. Referensi terdahulu (sebelum tahun 2018) dipelajari untuk memahami konsep dasar penyusunan sistem kendali siklotron, sedangkan referensi terkini (2018-sekarang) digunakan sebagai pertimbangan agar desain sistem yang dibuat dapat dengan mudah di-*upgrade* dan dioptimasi mengikuti perkembangan teknologi saat ini.

Sejak awal penelitian dan pengembangan (litbang), rancang bangun siklotron DECY-13 di tahun 2010 banyak mengacu pada pengembangan siklotron medis di Korea, termasuk di dalamnya desain SIK, yang juga mengacu pada desain milik KIRAMS Korea. Pada umumnya, perangkat yang digunakan untuk sistem kendali adalah PLC, perangkat lunak LabVIEW, dan modul-modul dari National Instruments [20], [21]. Pada dasarnya, dalam proses rancang bangun SIK diperlukan tiga elemen, yaitu sumber daya manusia, perangkat lunak (*software*), dan perangkat keras (*hardware*). Perangkat lunak diperlukan untuk analisis data, protokol komunikasi, simulasi, otomatisasi, penyimpanan data, dan konfigurasi kendali. Sementara itu, beberapa komponen perangkat keras yang digunakan adalah sistem akuisisi data, perangkat untuk *website* dan jaringan, perangkat *timing*, perangkat proteksi, PLC, aktuator, dan sensor [12].

Untuk desain SIK DECY-13 tahap awal, kegiatan difokuskan pada desain yang memiliki fleksibilitas dan kekokohan (*robustness*), kendali *local plant* harus terintegrasi dengan kendali utama (*main plant*), sistem pemrograman yang dibuat harus *programmer-friendly*, kemudahan akses ke *local control*, memberikan kestabilan arus berkas, dan yang terakhir



Gambar 1. Alur metode perancangan SIK siklotron DECY-13.

adalah antarmuka pengguna (*user interface*) dan perawatan sistem yang mudah [20]. Dengan berbagai referensi dan pertimbangan yang telah disebutkan, alur perancangan dapat ditentukan dan disajikan seperti pada Gambar 1. Langkah pertama adalah studi literatur tentang perkembangan SIK pada akselerator, khususnya siklotron medis, serta mempelajari komponen-komponen siklotron DECY-13 dan sistem operasi pada siklotron medis komersial. Selanjutnya, dilakukan identifikasi perangkat kendali dan parameter pada komponen utama serta penyusunan diagram alir operasi. Dari semua proses tersebut, dapat disusun arsitektur SIK beserta komponen-komponen yang akan digunakan, yang nantinya digunakan sebagai panduan dalam rancang bangun pada penelitian berikutnya.

## III. OVERVIEW SIKLOTRON DECY-13

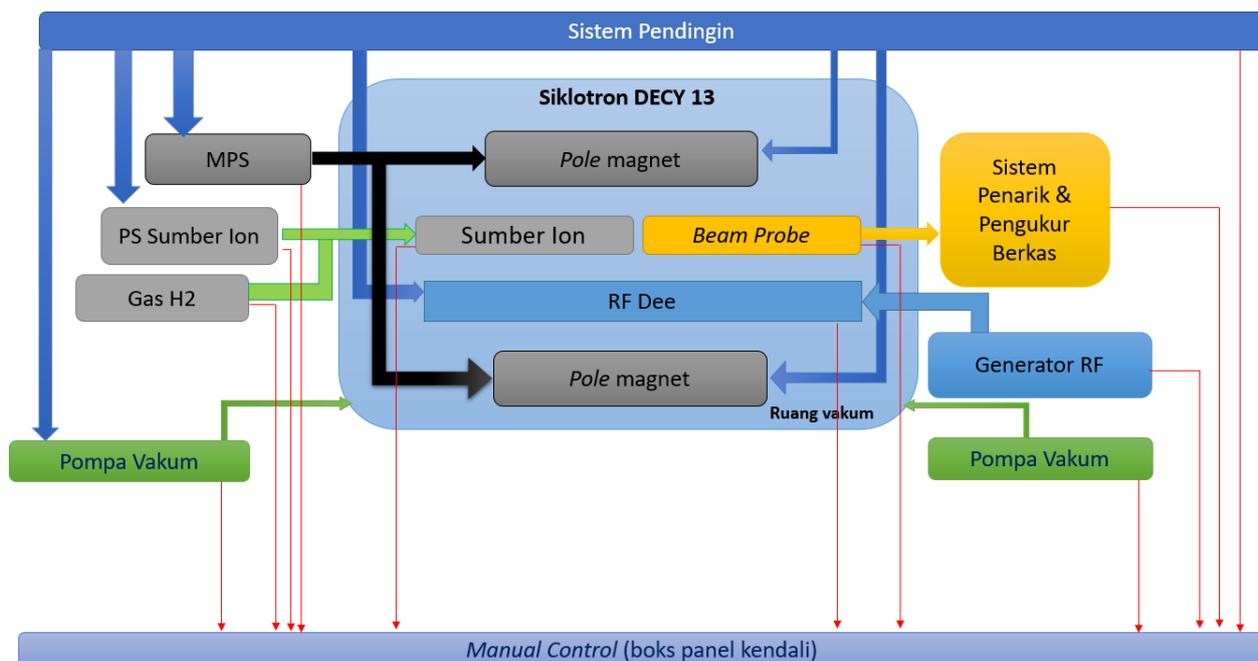
Proses litbang siklotron DECY-13 yang telah dilakukan sejak tahun 2009 didesain untuk menghasilkan partikel dengan energi 13 MeV dan arus 50  $\mu\text{A}$  untuk produksi  $^{18}\text{F}$  [22]. Prosedur persiapan *commissioning* yang telah dilakukan adalah pengujian kualitas arus berkas di area pusat, pengujian magnet dengan melakukan pemetaan dan *shimming*, pengujian generator RF dengan beban *dummy* (*dummy load*), dan pengukuran impedansi sistem RF-*dee* dengan *network analyzer* [3], [11], [23]–[25]. Dari pengujian tersebut, dapat ditentukan spesifikasi dan parameter-parameter penting pada komponen utama yang memengaruhi kinerja komponen secara individu ataupun secara terintegrasi dalam sistem siklotron DECY-13. Ilustrasi sederhana dalam bentuk diagram blok dari siklotron DECY-13 diperlihatkan pada Gambar 2.

### A. SISTEM SUMBER ION

Eksperimen untuk menguji kinerja sumber ion telah dilakukan beberapa kali menggunakan tegangan DC 2.000 kV untuk menarik berkas partikel keluar dari *head* sumber ion. Hasil terbaik untuk arus berkas yang keluar dari sumber ion terukur sebesar 126  $\mu\text{A}$  dan 170  $\mu\text{A}$  di area *central region*, sedangkan arus minimal yang diharapkan tertarik dari sumber ion adalah 200  $\mu\text{A}$ . Selama proses pengujian ini, beberapa parameter selalu dimonitor dan juga dikendalikan secara manual, di antaranya nilai vakum, laju gas hidrogen, nilai tegangan dan arus catu daya (*power supply*, PS) untuk katode sumber ion, dan arus koil magnet [3], [10]. Tegangan DC 2.000 kV, yang disebut juga dengan tegangan *puller*, adalah pengganti tegangan RF pada sistem akselerator. Fokus pengujian pada sistem sumber ion adalah untuk menghasilkan arus berkas di area *central region* dengan stabil sebelum nantinya dipercepat secara siklik sampai dengan energi 13 MeV.

### B. SISTEM MAGNET

Pada sistem magnet siklotron DECY-13 terdapat dua komponen utama, yaitu *magnet power supply* (MPS) dan



Gambar 2. Ilustrasi diagram blok komponen-komponen dalam siklotron DECY-13.

sistem elektromagnet. MPS berfungsi menyuplai daya ke kumparan sistem elektromagnet agar menghasilkan arus stabil. Parameter penting komponen MPS yang memengaruhi operasi siklotron adalah arus dan indikator sistem *interlock* internal [26]. Operasi sistem magnet ini harus stabil, sehingga memberikan nilai medan magnet tertentu agar berkas partikel yang dipercepat melalui sistem akselerator bergerak sesuai jalurnya dan berhasil dipercepat sampai dengan energi 13 MeV [5].

### C. SISTEM GENERATOR RF

Generator RF dalam siklotron berfungsi sebagai sumber tegangan sistem pemercepat partikel untuk mencapai energi tertentu. Komponen ini terdiri atas tiga buah modul, yaitu modul pembangkit sinyal RF dengan teknik *direct digital synthesizer* (DDS), modul penguat pendorong (*driver amplifier*), dan modul penguat akhir (*final amplifier*). Pada pengujian terakhir, daya yang dihasilkan telah mencapai 6,8 kW dengan menggunakan beban *dummy* [11]. Parameter utama dalam operasi generator RF adalah daya yang berhasil dibangkitkan, sedangkan parameter yang memengaruhi proses pembangkitan daya di antaranya frekuensi, tegangan, umpan daya, daya balik, suhu modul, fase, daya maju (*forward*), dan daya terpantul (*reflected*) [4].

### D. SISTEM AKSELERATOR (RF-DEE, LINER, DAN CAVITY)

Sistem RF-dee pada DECY-13 didesain mempunyai frekuensi 77,76 Hz untuk mempercepat partikel hingga energi 13 MeV. Pengukuran dengan *network analyzer* menunjukkan frekuensi 77,75 MHz dengan posisi *fine tuner* 11 mm dan nilai impedansi  $32,6 W + j29,0 W$  [9], [25]. Optimasi bentuk *coupler* dan rangkaian modul penguat akhir sampai saat ini masih terus dilakukan agar diperoleh nilai frekuensi yang sesuai dan *impedance matching* dapat terjadi.

### E. SISTEM DETEKSI BERKAS

Proses pengukuran berkas dilakukan menggunakan *beam probe* yang dihubungkan pada kawat konduktor dan terpasang di dalam tangkai *probe* dan secara kelistrikan terisolasi dengan

tangkai dan perangkat lain dari *probe*. Pengujian pernah dilakukan melalui eksperimen sumber ion menggunakan tegangan *puller* sebagai penarik partikel. Pada eksperimen ini, parameter penting yang terukur adalah arus partikel yang tertangkap pada *probe tip* di area *central region* [3]. Desain untuk penangkap berkas partikel dibuat dengan menggunakan lembaran tembaga setebal 0,25 mm [27]. Pada kondisi seperti ini, selain arus berkas, posisi *beam probe* juga menentukan dalam validasi posisi sebagai fungsi energi partikel yang dipercepat.

### F. SISTEM VAKUM

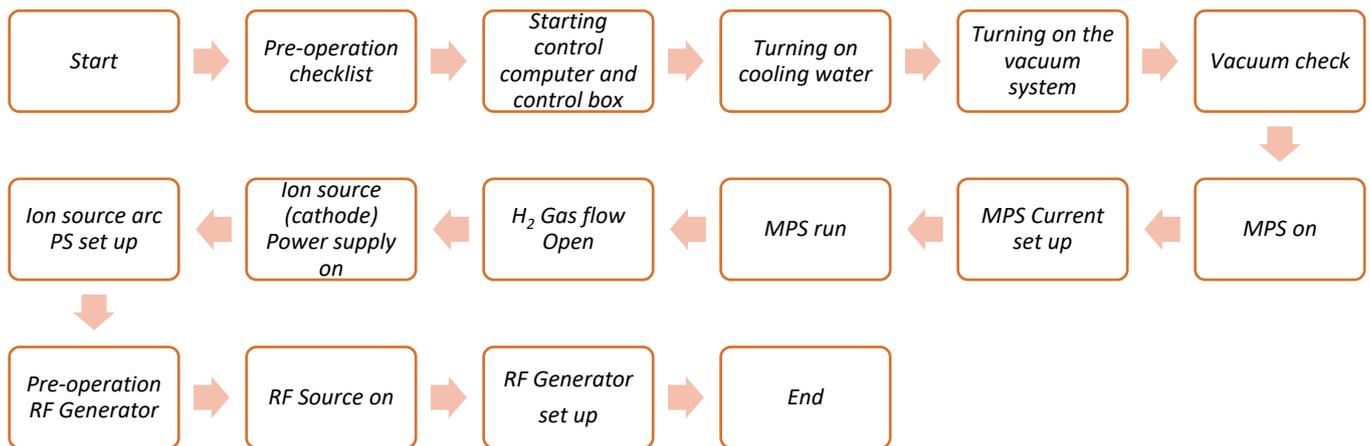
Sistem vakum siklotron DECY-13 terdiri atas beberapa komponen, yaitu pompa *rotary* untuk pemrosesan vakum rendah, pompa difusi untuk pemrosesan vakum tinggi, dan beberapa katup (*valve*) yang diatur sedemikian rupa buka/tutupnya untuk mendapatkan nilai vakum sesuai harapan [28]. Sistem vakum dalam operasi siklotron sangat vital karena memengaruhi nilai arus berkas yang dihasilkan. Pada saat operasi normal siklotron, nilainya dipertahankan pada  $10^{-6}$  torr agar nilai arus berkas partikel yang dipercepat stabil dengan nilai yang optimum.

## IV. PROSES DESAIN SISTEM

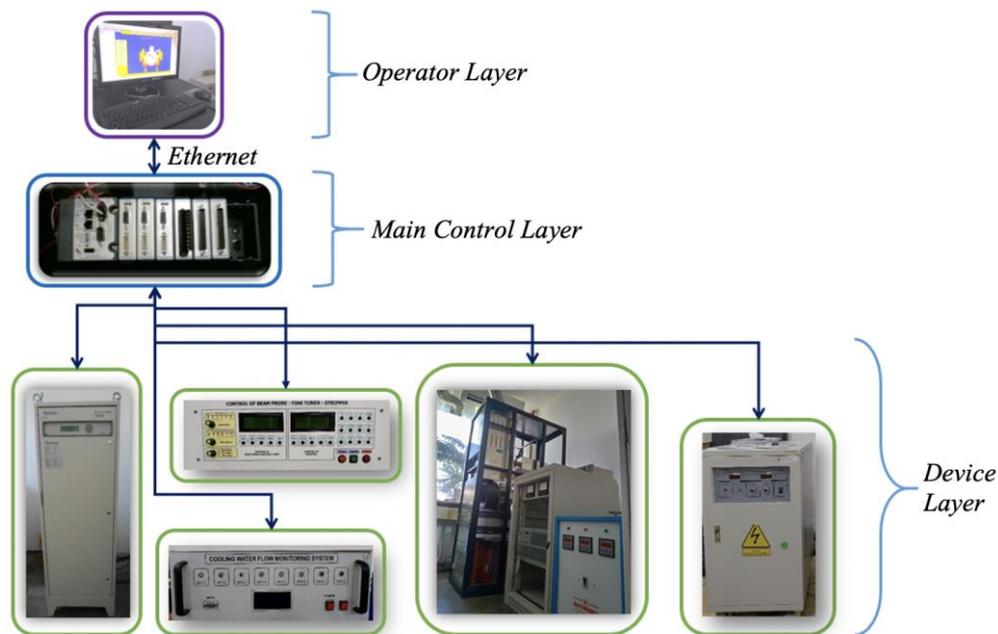
### A. PERANCANGAN FLOWCHART OPERASI DAN IDENTIFIKASI PARAMETER OPERASI

Operasi siklotron secara umum dapat dipelajari dari beberapa manual operasi siklotron komersial dan bertanya langsung kepada operator siklotron di rumah sakit [10]. Untuk siklotron yang digunakan khusus bagi penelitian, beberapa literatur dari Reutger dapat digunakan sebagai panduan [29]. Informasi juga diperoleh dari pakar secara langsung, salah satunya adalah Prof. Jong Seo Chai dari Sungkyunkwan University, Korea, saat mengisi kegiatan *workshop* di PRITA. Selain itu, eksperimen beberapa komponen utama siklotron DECY-13 yang telah dilakukan juga menjadi acuan penting untuk penyusunan langkah-langkah operasi.

Dari berbagai studi tersebut, langkah-langkah operasi siklotron DECY-13 dapat disusun seperti diilustrasikan pada



Gambar 3. Diagram alir operasi siklotron DECY-13 saat *commissioning*.



Gambar 4. Skema sistem kendali siklotron DECY-13.

diagram alir di Gambar 3. Prosedur operasi di sini diperlukan untuk langkah berikutnya, yaitu pada saat mendesain antarmuka pengguna dan integrasi panel-panel operasi, sehingga mudah dioperasikan oleh operator. Secara garis besar, operasi siklotron DECY-13 diawali dengan memenuhi ceklis semua komponen prasyarat operasi, di antaranya kesiapan sistem catu daya masing-masing komponen utama, sistem pendingin, sistem *interlock* masing-masing komponen, dan sistem keselamatan personel serta alat selama operasi. Apabila ceklis sudah terpenuhi, langkah selanjutnya adalah menyalakan sistem komputer utama, panel boks utama, dan komponen.

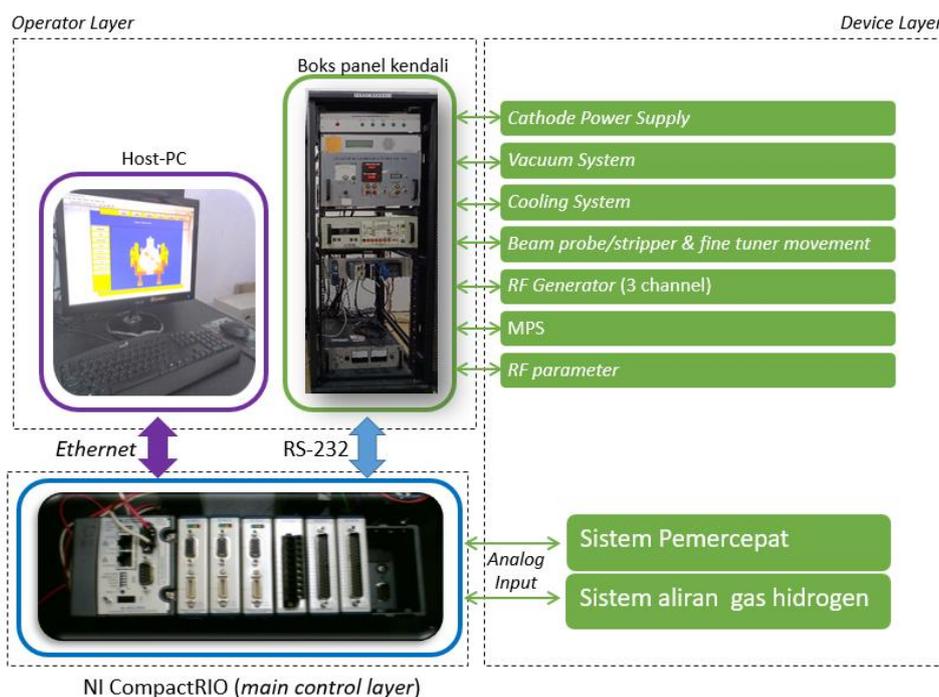
Langkah berikutnya adalah menyalakan sistem air pendingin yang terdiri atas *chiller* dan sistem *demineralizer*. Kemudian, ditunggu beberapa saat sampai syarat operasi untuk air pendingin di semua komponen utama telah terpenuhi. Langkah selanjutnya adalah menyalakan sistem vakum hingga kevakuman mencapai angka  $10^{-6}$  torr agar arus berkas yang dipercepat mencapai nilai optimum dan juga untuk mengurangi terjadinya *discharge* pada komponen-komponen yang berada dalam ruang vakum karena dapat merusak komponen tersebut.

Setelah vakum mencapai nilai  $10^{-6}$  torr, MPS dinyalakan dengan pengaturan arus maksimum 200 A dan tegangan 100 V.

Untuk kestabilan medan magnet, MPS dioperasikan selama kurang lebih 30 menit terlebih dahulu, baru kemudian catu daya katode sumber ion dinyalakan. Sebelum catu daya dinyalakan, terlebih dahulu gas hidrogen dimasukkan ke dalam ruang vakum dengan nilai kurang lebih 5-6 sccm. Arus dan tegangan katode dinaikkan secara perlahan untuk menghindari *discharge* dan untuk menghasilkan kestabilan arus. Setelah arus katode terpenuhi, sistem dibiarkan selama 30 menit agar tercapai kestabilan, baru generator RF dinyalakan. Generator RF dioperasikan untuk mentransfer daya 10 kW dengan frekuensi 77,76 MHz ke dalam sistem akselerator [11]. Pada saat daya tertansfer sempurna ke sistem akselerator, partikel yang berada pada *head* sumber ion akan tertarik keluar dan bergerak melingkar dipercepat sampai energi tertentu hingga menumbuk ekstraktor yang selanjutnya akan diteruskan ke sistem target dan kemudian diproses untuk produksi radioisotop.

## B. PERANCANGAN ARSITEKTUR SISTEM KENDALI

Fokus utama dalam desain integrasi sistem operasi DECY-13 adalah sistem yang sederhana dan *user-friendly*, sehingga operator mudah mengoperasikan siklotron pada saat *commissioning*. Oleh karena itu, arsitektur yang dibuat ini



Gambar 5. Konfigurasi SIK siklotron DECY-13.

menggunakan DCS yang terdiri atas tiga *layer* (lapisan), yaitu *device layer*, *main control layer*, dan *operator layer*, seperti disajikan pada Gambar 4. Metode ini juga digunakan oleh KIRAMS untuk desain SIK pada siklotron 13 MeV generasi awal karena konfigurasinya yang sederhana, lebih fleksibel, dan mudah dalam perawatan [18]. *Device layer* terdiri atas komponen-komponen utama DECY-13 dan sistem kendali lokalnya yang terinstal dalam boks panel kendali. *Main control layer* adalah *controller* utama operasi siklotron dengan menggunakan *high-performance embedded controllers* dan modul-modul yang mendukung proses komunikasi antara *device layer* dan *main control layer*.

Dalam proses *commissioning* siklotron DECY-13, operator mengendalikan operasi siklotron melalui antarmuka pengguna yang berupa boks panel kendali yang terintegrasi dengan *host-PC*. Selain sebagai antarmuka pengguna, *host-PC* juga digunakan untuk *data logging* dan menampilkan infografik parameter penting pada saat operasi.

## V. PEMBAHASAN

Untuk kondisi saat ini, pada *device layer* terdapat komponen-komponen utama siklotron dengan kendali lokal yang menggunakan *controller* berupa PLC produk TRILOGI atau mikrokontroler ATmega yang berfungsi sebagai pengendali komponen lokal selama proses pengujian sistem. Selain itu, beberapa komponen utama siklotron juga sudah memiliki boks panel kendali sebagai antarmuka pengguna dalam pengoperasian.

Komponen utama yang sudah dilengkapi dengan PLC adalah sistem vakum, sistem penggerak-penggerak *fine tuner*, *beam probe*, dan *stripper*. Sementara itu, tiga subkomponen dari generator RF menggunakan mikrokontroler. Untuk komponen-komponen tersebut telah disediakan jalur komunikasi RS-232, yang memudahkan koneksi dengan *main control layer*. Hal ini berbeda dengan komponen-komponen utama yang lain, seperti sistem sumber ion, sistem pendingin, sistem magnet, sistem akselerator, dan sistem deteksi berkas, yang masih belum terintegrasi secara penuh di bagian

subkomponennya. Dengan kondisi seperti ini, masih perlu dilakukan penambahan komponen dan modifikasi agar komponen-komponen tersebut dapat terintegrasi dengan *main control layer*.

Sistem sumber ion yang terdiri atas empat katode dan sistem aliran gas hidrogen dikendalikan secara manual, terpisah oleh operator pada saat pengujian. Maka, untuk dapat diintegrasikan dengan *main control layer*, perlu ditambahkan kendali lokal sekaligus jalur komunikasi RS-232 pada masing-masing komponen. Sementara itu, pada sistem pendingin, PLC digunakan untuk pemantauan, dengan LCD sebagai penampil parameter pada boks panel kendali. Untuk proses integrasi, cukup ditambahkan kabel RS-232 dari PLC ke *main control layer*. Selain sebagai *data logger* dan tampilan infografik, *controller* sistem pendingin pada *device control layer* juga dapat memberikan sinyal *interlock* pada beberapa komponen utama yang menggunakan sistem pendingin, seperti pompa difusi pada sistem vakum, MPS, sumber ion, elektromagnet, dan sistem akselerator RF (*dee-cavity-coupler*). Hal ini dapat menjaga perangkat pada siklotron DECY-13 sehingga lebih aman dari kerusakan.

Untuk sistem magnet yang terdiri atas MPS dan sistem elektromagnet, *controller* lokal telah tersedia pada internal MPS yang juga telah terfasilitasi dengan jalur komunikasi RS-232. Di sisi lain, pada sistem akselerator dan sistem deteksi berkas, untuk integrasi, *main control* dihubungkan dengan modul *analog input* dengan parameter utama tegangan *dee* dan arus berkas partikel yang terukur pada *beam probe*.

Ilustrasi SIK komponen utama siklotron yang telah terintegrasi dengan metode DCS disajikan pada Gambar 5, dengan posisi *host-PC* dan panel boks kendali berdekatan. Selain proses identifikasi parameter kendali yang telah dijelaskan di atas, juga dilakukan identifikasi parameter operasi tiap komponen utama yang dilampirkan pada Tabel I pada halaman lampiran. Identifikasi parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam penelitian berikutnya dalam penyusunan program untuk antarmuka pengguna pada *host-PC* dan *data logger*.

## VI. KESIMPULAN

Pada proses desain SIK untuk *commissioning* siklotron DECY-13, telah diperoleh desain yang memudahkan operator dalam melakukan operasi dan pengamatan selama proses *commissioning*. Selain itu, dalam jangka pendek desain yang sederhana akan memudahkan implementasi dan untuk jangka panjang akan memudahkan dalam *upgrade* sistem, perawatan rutin atau proses *troubleshooting* jika terjadi permasalahan pada sistem.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penulisan makalah ini.

## KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Frida Iswinning Diah, Fajar Sidik Permana, dan Emy Mulyani; konsep sistem kendali akselerator, Frida Iswinning Diah dan Fajar Sidik Permana; *overview* siklotron DECY-13, Frida Iswinning Diah dan Fajar Sidik Permana; pengembangan sistem kendali siklotron DECY-13, Frida Iswinning Diah dan Fajar Sidik Permana; pembahasan, Frida Iswinning Diah, Fajar Sidik Permana, dan Emy Mulyani; penulisan—kerangka dan alur makalah, Emy Mulyani; penulisan—peninjauan, Emy Mulyani.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak Saminto, S.T. dan Bapak Anang Susanto, S.T. atas bimbingannya di lapangan serta seluruh tim siklotron DECY-13.

## REFERENSI

- [1] Silakhuddin dan I.A. Kudus, "Study of Development of the DECY-13 Cyclotron Based on Applied Physics Learning," *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 80, hal. 880-886, Mei 2022, doi: 10.1007/s40042-022-00434-w.
- [2] Saefurrochman, Saminto, dan A. Susanto, "Analisis Perancangan Sistem Instrumentasi Perangkat Pengatur Posisi Sumber Ion DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2018, hal. 369-376.
- [3] S. Silakhuddin dkk., "Ion Beam Preliminary Testing of DECY-13 Cyclotron at the Central Region Using DC Extraction Voltage," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 432, hal. 1-7, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/432/1/012026.
- [4] F.S. Permana, A.D. Atmaja, dan A. Wijayanto, "Perancangan Sistem Akuisisi dan Kendali Generator RF Siklotron DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2018, hal. 115-118.
- [5] F.S. Permana dan Suharni, "Sistem Akuisisi Data Sumber Daya Magnet MPS 8500 dan Karakterisasinya untuk Pengoperasian Siklotron DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2018, hal. 197-202.
- [6] S. Saminto, F.S. Permana, A. Susanto, dan E. Priyono, "Rancang Bangun Perangkat Instrumentasi Kendali pada Sistem Pendingin Siklotron DECY-13 MeV," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2017, hal. 167-176.
- [7] J. Galambos, "Commissioning Strategies and Methods," *CERN Accel. Sch.: High Power Hadron Mach.*, 2013, hal. 465-480.
- [8] S.G. Biedron, A. Edelen, E. Meier, dan S. Milton, "Intelligent Controls and Modeling for Particle Accelerators and Other Research and Industrial Infrastructures," *12th Int. Workshop Emerg. Technol., Sci. Facil. Controls*, 2018, hal. 156-159, doi: 10.18429/JACoW-PCaPAC2018-THCB5.
- [9] R.S. Darmawan, K. Wibowo, dan F.I. Diah, "Initial Optimization of fine Tuner's Position on the Cyclotron DECY-13's RF Dee System," *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 1436, hal. 1-6, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012086.
- [10] S. Silakhuddin, R.S. Darmawan, S. Suharni, dan I.A. Kudus, "Characterization on DECY-13 Cyclotron Components," *To Phys. J.*, Vol. 3, hal. 64-72, 2019.
- [11] A. Dwiatmaja, T. Atmono, dan Saminto, "The Behaviour of RF Generator for Power Supply of Dee in The Cyclotron DECY-13," *Proc. Int. Conf. Nuclear Capacity Building, Educ., Res. Appl. (I-Concern'19)* 2019, hal. 552-557.
- [12] F. Luis dan G. Moncayo. Instrumentation Integration. (2009). USPAS09. Albuquerque, AS: University of New Mexico.
- [13] H.S. Chang dkk., "Control System Design of KIRAMS-13 Cyclotron," *Proc. APAC 2004*, 2004, hal. 326-328.
- [14] Z. Li dkk., "General Engineering Consideration for the 100MeV Cyclotron," *Proc. 17th Int. Conf. Cyclotrons, Their Appl.* 2004, 2004, hal. 1-3.
- [15] K.S. White dkk., "Modernizing the SNS Control System," *18th Int. Conf. Acc., Large Exp. Phys. Control Syst.*, 2021, hal. 21-25, doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-MOAR01.
- [16] A. Trifonov dkk., "The Control System of the LINAC-200 Electron Accelerator at JINR," *18th Int. Conf. Acc., Large Exp. Phys. Control Syst.*, 2021, hal. 302-306, doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-TUAR03.
- [17] V. Aleinikov, V. Badmatsyrenova, S. Pachtchenko, dan K. Sychev, "Control System User Interface for the Cyclotron DC-280," *26th Russ. Part. Accel. Conf.*, 2018, hal. 435-436, doi: 10.18429/JACoW-RUPAC2018-THPSC13.
- [18] L.S. Perissinotto, F.H. Cardoso, dan M.M. Donatti, "CompactRIO Custom Module Design for the Beamline's Control System at Sirius," *18th Int. Conf. Acc., Large Exp. Phys. Control Syst.*, 2021, hal. 715-719, doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-WEPV028.
- [19] A. Uchiyama dkk., "Control System of the SRILAC Project at RIBF," *18th Int. Conf. Acc., Large Exp. Phys. Control Syst.*, 2021, hal. 147-152, doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-MOPV015.
- [20] A. Abdorrahman dkk., "Control System of 10-MeV Baby Cyclotron," *Proc. 20th Int. Conf. Cyclotrons, Their Appl.*, 2013, hal. 156-158.
- [21] Y.S. Lee dkk., "The Development of Control System for 9 MeV Cyclotron," *Proc. 20th Int. Conf. Cyclotrons, Their Appl.*, 2013, hal. 159-161.
- [22] Silakhuddin dan S. Santosa, "Conceptual Design Study of 13 MeV Proton Cyclotron," *Atom Indones.*, Vol. 38, No. 1, hal. 7-14, Apr. 2012, doi: 10.17146/aij.2012.135.
- [23] Silakhuddin, "Persiapan dan Prosedur Pre-Commissioning Siklotron DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2016, hal. 151-157.
- [24] I.A. Kudus, Taufik, K. Wibowo, dan F.S. Permana, "Perbandingan Hasil Konstruksi Terhadap Hasil Simulasi Dari Isokronus Magnet Siklotron DECY-13," *J. Iptek Nukl. Ganendra*, Vol. 20, No. 2, hal. 83-90, Jul. 2017, doi: 10.17146/gnd.2017.20.2.3577.
- [25] R.S. Darmawan dan A. Dwiatmaja, "Penyesuaian Nilai Impedansi Komponen Coupler Sistem RF Dee Siklotron DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2018, hal. 359-362.
- [26] *Magnet Power Supply 855: System 8500*, DANFYSIK A/S, Taastrup, Denmark, 2012.
- [27] Silakhuddin dan R.S. Darmawan, "Desain Perangkat Pengukuran Energi Partikel Proton dengan Teknik Aktivasi Tumpukan Keping pada Siklotron DECY-13," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2018, hal. 349-354.
- [28] F.S. Permana, Saminto, K. Wibowo, dan V.A.F. Sari, "Human Machine Interface Berbasis Labview untuk Operasi Sistem Vakum Siklotron Proton DECY-13 MeV," *Pros. Pertem. Present. Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetah. Teknol. Nukl.*, 2016, hal. 186-192.
- [29] T.W. Koeth, "Undergraduate Education with the Rutgers 12-Inch Cyclotron," *Phys. Procedia*, Vol. 66, hal. 622-631, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.083.

LAMPIRAN

TABEL I  
 KONFIGURASI SIK PARAMETER OPERASI KOMPONEN SIKLOTRON DECY-13.

No.	Subsistem	Parameter	Keterangan
1	Sistem pendingin	Level ketinggian air	Level <i>water torn (make up water)</i>
		Temperatur air	Temperatur <i>water cooling tower (CT)</i>
		Laju aliran air	Aliran air dari CT ke <i>chiller I</i>
		Konduktivitas air	Temperatur air <i>in/out chiller</i>
2	Sistem vakum	Nilai vakum	Nilai vakum rendah dan tinggi
		Temperatur <i>heater</i>	Suhu oli pemanas pompa difusi
		Posisi <i>valve (on/off)</i>	Posisi <i>valve</i> pada sistem vakum
3	Sistem magnet	Temperatur air pendingin	MPS dan koil magnet
		Laju aliran air pendingin	MPS dan koil magnet
		Temperatur <i>in/out</i> air pendingin	MPS dan koil magnet
		Status interlok	MPS
		Status <i>ready</i>	MPS
		Arus dan tegangan <i>in/out</i>	MPS
4	Sistem sumber ion	Tegangan katode	terbaca pada <i>power supply</i> sumber ion
		Arus katode	terbaca pada <i>power supply</i> sumber ion
		Laju gas	Laju Gas H <sub>2</sub> dari tabung ke ruang vakum siklotron
		Posisi sumber ion	Gerak sumber ion mendekat/menjauhi <i>central region</i> dan gerakan ke atas dan ke bawah
		Bukaan <i>valve</i> gas	Posisi bukaan <i>valve</i> pengatur laju gas sumber ion
5	Sistem RF		
	DDS exciter	$V_{DC}$	Keluaran tegangan DC
		$I_{DC}$	Keluaran arus DC
		<i>Reflected</i>	Daya RF yang terpantul balik
		<i>Forward</i>	Daya RF ditransmisikan
		Temperatur	Temperatur DDS saat operasi
	Driver amplifier	$V_{DC}$	Keluaran tegangan DC
		$I_{DC}$	Keluaran arus DC
		<i>Reflected</i>	Daya RF yang terpantul balik
		Temperatur	Daya RF ditransmisikan
	Final amplifier	<i>Plate voltage</i>	Tegangan plat anoda
		<i>Plate current</i>	Arus plat anoda
		<i>Filament voltage</i>	Tegangan filamen tabung triode
		<i>Reflected</i>	Daya RF balik saat transmisi
<i>Forward</i>		Daya RF ditransmisikan	
6	Sistem akselerator ( <i>dee, cavity, coupler, liner</i> )	Temperatur air pendingin	Temperatur air pendingin <i>dee</i>
		Frekuensi, fase, amplitudo	Sistem <i>dee</i>
		Posisi <i>fine tuner</i>	Sistem <i>dee</i>
7	Sistem deteksi berkas	Arus berkas	Berkas partikel yang terekstrak dari <i>head</i> sumber ion
		Posisi <i>beam probe</i>	Jarak <i>beam probe</i> terhadap <i>central region</i>