Desain Konseptual *Internet Accelerator Laboratory* (IAL) untuk Siklotron DECY-13

Frida Iswinning Diah[1], Idrus Abdul Kudus[2], Suharni[3], Fajar Sidik Permana[4], Taxwim[5]

***Intisari*—Pusat Riset dan Teknologi Akselerator Organisasi Riset Tenaga Nuklir Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTA ORTN-BRIN) telah menjadi Pusat Unggulan Iptek (PUI), khususnya di bidang akselerator partikel. Salah satu penelitiannya adalah rancang bangun siklotron DECY-13 untuk produksi radioisotop yang dimanfaatkan pada bidang medis untuk diagnosis kanker. Pada saat ini, litbang siklotron DECY-13 sedang menyelesaikan tahap akhir proses rancang bangunnya. Dalam rangka perluasan manfaat dari litbang ini, akan dibuat fasilitas *internet laboratory* yang mendukung pelatihan siklotron yang telah berjalan agar dapat diakses dengan lebih luas. Oleh karena itu, dibutuhkan kajian awal untuk penerapan *Internet Accelerator Laboratory* (IAL) siklotron DECY-13 yang meliputi penyusunan konsep untuk jangka panjang dan desain dari IAL yang akan digunakan. Penyusunan konsep jangka panjang mengikuti *road map* penelitian siklotron yang telah ditetapkan, sedangkan untuk konseptual desain, pengguna (*user*) di tahap awal penggunaan telah ditentukan, yaitu mahasiswa dan operator siklotron di rumah sakit. Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk memahami konsep *online laboratory* dan konsep pembelajaran akselerator yang telah diterapkan di negara lain dalam rangka penentuan persyaratan desain. Identifikasi kebutuhan perangkat IAL didasarkan pada tinjauan kondisi terkini laboratorium siklotron DECY-13 dan rencana penelitian di masa depan. Desain konseptual yang berhasil disusun terdiri atas *road map* penelitian tentang IAL untuk perencanaan penelitian dalam jangka panjang dan silabus materi untuk target dua pengguna, yaitu mahasiswa dan operator siklotron di rumah sakit. Sementara itu, identifikasi komponen IAL yang digunakan adalah CompactRIO sebagai pengendali utama pada sistem operasi siklotron dan juga sebagai penghubung dengan sistem jaringan. Komponen pendukung dalam sistem jaringan yang digunakan di antaranya adalah sistem basis data, server, LAN, internet, *webcam*, dan *website* atau suatu aplikasi untuk diakses oleh pengguna.**

***Kata Kunci*—Siklotron, *Internet Accelerator Laboratory*, *Education*, *Distance Learning*.**

I. PENDAHULUAN

Salah satu aplikasi teknologi nuklir di bidang kesehatan adalah penggunaan *positron emission tomography* (PET) untuk diagnosis kanker. Penggunaan teknologi PET harus dibarengi dengan produksi radionuklida dan radiofarmaka yang dihasilkan oleh perangkat nuklir, salah satunya adalah siklotron. Pada saat ini, siklotron di Indonesia hanya tersedia di empat rumah sakit, yaitu RS Gading Pluit, MRCCC Siloam Hospital, RS Kanker Dharmais [1], yang ketiganya berada di kota Jakarta, dan RSUD Abdul Wahab Sjahranie di Samarinda. Kondisi seperti ini memperlihatkan pelayanan kesehatan yang tidak merata di seluruh wilayah di Indonesia. Berdasarkan data Riskesdas, penyakit kanker dari tahun ke tahun mengalami peningkatan, dari 1,4 per 1.000 penduduk di tahun 2013 menjadi 1,79 per 1.000 penduduk pada tahun 2018. Prevalensi kanker tertinggi adalah di provinsi D.I. Yogyakarta dengan 4,86 per 1.000 penduduk, diikuti Sumatera Barat 2,47 per 1.000 penduduk dan Gorontalo 2,44 per 1.000 penduduk [2].

Pusat Riset dan Teknologi Akselerator (PRTA) Organisasi Riset Tenaga Nuklir - Badan Riset dan Inovasi Nasional (ORTN-BRIN) telah melakukan kajian, litbang, dan rancang bangun siklotron sejak tahun 2009 dan diberi nama *Design Experimental of Cyclotron in Yogyakarta* - 13 MeV (DECY-13). Secara mendasar, tujuan litbang ini adalah mendukung kemandirian dalam rancang bangun siklotron untuk produksi radioisotop yang pada akhirnya nanti digunakan sebagai bahan baku radiofarmaka. Dengan melakukan litbang siklotron, diharapkan muncul sumber daya manusia (SDM) yang memiliki keahlian dan keterampilan terhadap dasar teknologi, desain, instalasi, dan perawatan siklotron. Selain itu, dalam jangka panjang, keberadaan laboratorium siklotron juga memberikan manfaat dan peluang untuk menghasilkan SDM baru secara kontinu yang nantinya diharapkan dapat menambah tenaga ahli yang mampu mengoperasikan dan melakukan perawatan siklotron di rumah sakit. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengkajian agar teknologi siklotron yang telah dibuat di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) memiliki keluaran atau kontribusi riset yang signifikan. Salah satunya adalah cara menggunakan laboratorium siklotron yang sudah ada saat ini untuk proses pembelajaran atau pelatihan yang bertujuan untuk mendukung SDM di bidang nuklir yang kompeten.

Pelatihan tentang siklotron DECY-13 sudah pernah terlaksana di tahun 2019 dan 2020 dengan peserta internal Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), yang saat ini berubah menjadi ORTN-BRIN. Setelah itu, terdapat permintaan pelatihan siklotron dengan mengundang pihak eksternal BATAN, di antaranya dari perguruan tinggi, rumah sakit, industri, dan kementerian/lembaga lain yang terkait, baik dalam maupun luar negeri. Oleh karena itu, perlu suatu metode atau konsep yang berbeda dengan sebelumnya yang tetap memberikan keluaran pelatihan yang lebih baik dengan jangkauan pengguna yang lebih luas. Salah satunya adalah menggunakan konsep daring (*online*) atau konsep pembelajaran jarak jauh. Konsep pembelajaran jarak jauh diawali dengan studi atau kajian dalam rangka mengidentifikasi

[1,2,3,4,5] *Pusat Riset dan Teknologi Akselerator – Organisasi Riset Tenaga Nuklir – Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Babarsari kotak pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281 Indonesia Telepon (0274) 488435, 464436; e-mail: [1]frid002@brin.go.id, [2]idru002@brin.go.id, [3]suharni@batan.go.id, [4]fajar.sidik@batan.go.id, [5]taxwim@batan.go.id)*

[Diterima: 19 November 2021, Revisi: 1 Januari 2022]

dan membuat daftar kebutuhan pelatihan tentang teknologi siklotron serta sarana dan prasarana yang mampu mendukungnya. Termasuk di dalamnya adalah penentuan metode dalam mengatasi kebutuhan praktikum secara langsung di lapangan agar materi pelatihan dapat disampaikan secara komprehensif.

Salah satu metode pembelajaran jarak jauh yang dapat dijadikan referensi adalah *Internet Reactor Laboratory* (IRL) yang telah terlaksana di PSTA-BATAN untuk pembelajaran tentang reaktor nuklir [3]. Dari program IRL yang telah diluncurkan pada tahun 2014, diperlihatkan efektivitas dan kemudahan dalam pelaksanaan pelatihan dan pendidikan tentang teknologi reaktor karena dapat dilakukan secara daring tanpa harus hadir di laboratorium. Hal ini menjadi peluang untuk diterapkan ke laboratorium yang lain, salah satunya laboratorium siklotron DECY-13. Tujuan dari kajian ini adalah tersusunnya suatu desain konseptual *Internet Accelerator Laboratory* (IAL) untuk siklotron DECY-13 berdasarkan studi literatur dan studi lapangan terkini. Dengan adanya desain konseptual ini, proses rancang bangun, pengadaan komponen, dan instalasi IAL pada penelitian berikutnya akan lebih mudah. Selain itu, perlu juga ditentukan *road map* jangka panjang penerapan IAL ini sampai dapat digunakan oleh pengguna agar langkah-langkah penelitian di masa depan lebih terukur dan sesuai target.

II. TINJAUAN KONSEPTUAL *INTERNET LABORATORY*

Penyusunan desain konseptual diawali dengan penentuan persyaratan desain yang dipelajari dari literatur terkini tentang *internet laboratory* dan kondisi laboratorium siklotron DECY-13.

A. Internet Laboratory sebagai Alternatif Metode Pembelajaran Jarak Jauh

Pada dasarnya, terdapat tiga tipe laboratorium untuk suatu proses *engineering*, yaitu tipe pengembangan (*development*), tipe penelitian (*research*), dan tipe pendidikan (*education*). Pada tipe pengembangan, laboratorium digunakan untuk mengarahkan suatu perancangan dan pengembangan produk serta menjawab permasalahan spesifik terkait suatu teori agar proses *engineering* dapat terus berlanjut. Selanjutnya, laboratorium penelitian digunakan untuk melakukan pengamatan lebih luas tentang suatu pengetahuan yang dapat digeneralisasi dan dibuat sistematis serta seringkali tanpa dibarengi tujuan khusus. Keluarannya berupa ilmu sehari-hari yang sudah digunakan manusia atau yang sudah berjalan secara alamiah. Tipe yang ketiga, yaitu laboratorium pendidikan, biasanya digunakan oleh para mahasiswa dalam mempelajari suatu ilmu yang sudah ada atau diketahui [4].

Beberapa program pelatihan di luar negeri telah banyak menggunakan *remote* atau *virtual laboratory* dengan berbagai tujuan, di antaranya untuk meningkatkan jumlah pengguna (*user*) laboratorium, fleksibilitas waktu dan tempat eksperimen, memperluas cakupan aktivitas dalam eksperimen, berbagi ilmu dan perangkat antar laboratorium atau antar universitas, dan juga kolaborasi antar mahasiswa dalam universitas yang berbeda [5]. Selain itu, penggunaan *remote laboratory* juga dapat menghemat SDM dalam suatu laboratorium [6].

Secara mendasar, fungsi *remote laboratory* adalah untuk menjembatani eksperimen nyata di laboratorium menggunakan internet sebagai sarana komunikasi yang dapat diakses dari mana pun. *Remote laboratory* sesuai untuk digunakan pada eksperimen tanpa harus berada langsung di depan *experimental set-up* dengan tetap menjaga kualitas dan pengalaman selama bereksperimen [7]. Konsep ini sudah banyak digunakan di banyak institusi untuk keperluan *online laboratory*. *Remote laboratory* dibuat sedemikian rupa untuk bereksperimen secara nyata melalui jaringan internet. Selain metode *remote*, ada juga metode *virtual laboratory* yang menggunakan perangkat lunak tertentu untuk simulasi suatu eksperimen [8], [9].

Selain istilah *remote* dan *virtual laboratory*, sering juga digunakan istilah *internet laboratory* atau ada yang menyebutnya dengan *e-lab*. Untuk *internet laboratory* seperti yang digunakan oleh IRL, titik tekannya ada pada penyiaran suatu kursus pelatihan melalui jaringan internet dipadu dengan interaksi antara instruktur dan peserta melalui suatu *teleconference* dan *website* khusus. Respons dua arah dapat ditingkatkan dengan keterlibatan peserta dalam melakukan suatu eksperimen [3]. Selain *teleconference*, dapat juga digunakan gabungan metode pembelajaran dengan penayangan klip video demonstrasi di laboratorium dan simulasi komputer atau *modelling* [10].

B. Konsep Pembelajaran Akselerator Partikel di Berbagai Negara

Benua Eropa telah memiliki laboratorium akselerator yang sangat maju dan modern, salah satunya adalah CERN, yang terdapat di perbatasan negara Perancis dan Swiss. CERN dengan *Large Hadron Collider* (LHC) beberapa tahun belakangan mulai fokus mengajarkan fisika partikel atau fisika akselerator energi tinggi ke masyarakat secara luas, salah satunya kepada murid sekolah menengah atas melalui kelas-kelas atau melalui guru-guru fisika yang dilatih secara khusus. Pengenalan LHC di kelas-kelas diawali dengan melakukan studi mendalam tiap komponen dasar pada LHC yang dapat dipelajari dengan mudah sekaligus media-media yang akan digunakan. Hal ini diharapkan mampu menambah daya tarik para calon siswa untuk memilih keilmuan fisika partikel [11].

Selain CERN, di Eropa juga terdapat Accelerator Research and Innovation for European Science and Society (ARIES) dengan program Massive Open Online Course (MOOC). MOOC diselenggarakan setelah dilakukan kajian mendalam tentang pelatihan akselerator yang telah dilakukan di benua Eropa selama ini. Dari kajian tersebut, diperoleh beberapa rekomendasi, di antaranya kursus *e-learning* untuk pengenalan ilmu dan teknologi akselerator, khususnya pada mahasiswa fisika atau teknik pada tingkat sarjana, tetapi juga terbuka kemungkinan untuk siapa pun yang tertarik terhadap teknologi ini [12]. Selain itu, di benua Amerika terdapat Fermilab dengan US Particle Accelerator School (USPAS) yang secara rutin mengadakan *accelerator school* tiap tahunnya sejak tahun 1987 dan masih banyak lagi universitas atau laboratorium akselerator yang menyelenggarakan kegiatan *accelerator school* sejenis [13].

Dari beberapa negara yang telah menyelenggarakan *accelerator school*, secara umum, kegiatan diadakan secara

(a) (b)

Gbr. 1 Laboratorium siklotron DECY-13 PSTA-BATAN Yogyakarta, (a) ruang siklotron (tampak luar), (b) siklotron DECY-13.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN SUB SISTEM SIKLOTRON DECY-13

No.	Nama Komponen	Hasil Pengujian
1	Sistem magnet: kuat medan magnet di pusat	Proses pengujian dilakukan dengan mengalirkan arus terhadap magnet siklotron dengan nilai tetap sebesar 133 A dengan temperatur aliran pendingin yang masuk ke sistem magnet pada 23ºC, suhu ruangan magnet siklotron berada pada nilai 25ºC dengan kelembapan 60%. Nilai medan magnet terbesar terukur pada saat proses *alignment* untuk *y* pada posisi *x* = 120 mm dengan medan magnet maksimal 1.962 T.
2	Sistem generator RF	Proses pengujian generator RF pada frekuensi 77,76 MHz menghasilkan keluaran daya akhir 7 kW.
3	Sistem sumber ion	Pengujian dilakukan pada kondisi kevakuman sekitar 7-8 × 10^{-6} Torr dan catu gas 5 sccm. Magnet beroperasi dengan kuat medan magnet antara 0,4 hingga 0,88 T. Dengan tegangan katode 1.250 V, arus katode 45 mA, dan tegangan *puller* (*Vpul*) = 2 kV diperoleh arus berkas sekitar (*Iion*) = 140 µA.
4	Sistem vakum	2,3 × 10^{-6} Torr (kondisi terbaik tanpa diberi masukan gas hidrogen).

klasikal dan tidak banyak yang melaksanakan pembelajaran secara daring. Layanan secara daring lebih banyak dilakukan pada akses secara gratis materi-materi dasar akselerator, seperti yang tersedia di *website* CERN dan Joint Accelerator Conferences Website (JACoW), sedangkan pelatihan daring dengan kurikulum terstruktur baru dilakukan oleh ARIES dengan MOOC. Target peserta MOOC adalah mahasiswa yang sedang menjalani pendidikan tinggi level S1. Setelah mendapatkan perkuliahan tentang fisika secara umum, para mahasiswa dapat mengambil pelatihan secara daring sebelum nantinya melanjutkan ke jenjang pascasarjana atau doktoral [12].

C. Kondisi Terkini Laboratorium Siklotron DECY-13 untuk Mendukung Proses Pembelajaran Akselerator

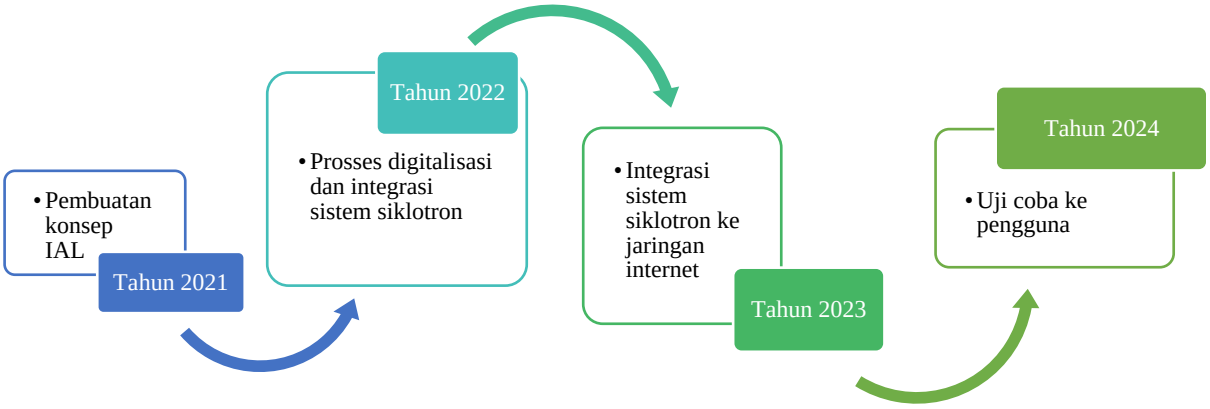
Akselerator siklik siklotron DECY-13 dibuat untuk aplikasi PET di bidang kedokteran nuklir dengan energi proton sekitar 13 MeV. Proses kajian, desain, dan rancang bangun telah dimulai sejak tahun 2009. Komponen utama pada siklotron DECY-13 terdiri atas tujuh komponen utama dan dua komponen pendukung. Komponen utama tersebut yaitu sistem sumber ion [14], [15], sistem magnet [16], [17], sistem vakum, sistem generator *radio frequency* (RF), sistem RF pemercepat, sistem pengukur berkas, dan sistem ekstraktor. Sementara itu, dua komponen pendukung terdiri atas sistem instrumentasi dan kendali (SIK) [18], serta sistem utilitas (kelistrikan dan pendingin).

Beberapa komponen telah terinstal dan diuji seperti sistem elektromagnet, sistem sumber ion, generator RF, sistem vakum, dan sistem pendingin [19]. Pengujian siklotron tahap awal dengan tegangan *direct current* (DC) dilakukan pada vakum 7-8 × 10^{-6} Torr, aliran gas hidrogen 5 sccm untuk uji coba sistem sumber ion. Pada uji coba ini, digunakan tegangan DC 35 kV sebagai tegangan penarik berkas dan menghasilkan arus berkas sebesar 35 µA [15], [20].

Kondisi gedung laboratorium siklotron saat ini diperlihatkan pada Gbr. 1. Sampai dengan tahun ini, dari tujuh komponen utama, empat komponen telah melewati beberapa kali pengujian dan telah dihasilkan data pengujian seperti ditampilkan pada Tabel I [16], [19]-[22]. Dari empat komponen tersebut, terdapat berbagai perangkat keras yang digunakan untuk menghasilkan suatu data pengujian atau parameter. Untuk kebutuhan *internet laboratory*, pendataan perangkat akuisisi data operasi perlu dilakukan agar dapat secara tepat menentukan perangkat *internet laboratory* yang akan digunakan.

TABEL II
DAFTAR KOMPONEN TERKINI SIKLOTRON DECY-13

No.	Nama Komponen	Instrumen/Perangkat Pengujian	Metode Operasi dan Status Sistem Akuisisi Data
1	Sistem magnet	1. Sistem elektromagnet 2. Catu daya magnet (MPS) 3. Sistem pendingin elektromagnet dan MPS	Seluruh komponen belum terintegrasi dengan komputer dan metode operasi manual.
2	Sistem generator RF	1. *Direct digital synthesizer* (DDS) 2. *Driver amplifier* 3. *Final amplifier* 4. *Panel watt meter* 5. *Digital watt meter* 6. *Analog watt meter*	Sebagian besar komponen telah terintegrasi dengan komputer dan metode operasi manual.
3	Sistem sumber ion	1. Sistem magnet 2. Sistem aliran gas hidrogen 3. Sistem motor penggerak 4. Sistem catu daya katode sumber ion 5. Sistem pengukur arus berkas 6. Sistem pendingin sumber ion	Seluruh komponen belum terintegrasi dengan komputer dan metode operasi manual.
4	Sistem Vakum	1. Pompa *rotary* 2. Pompa difusi 3. Sensor vakum 4. Vakum meter 5. Sistem pendingin vakum	Seluruh komponen telah terintegrasi dengan komputer dan metode operasi manual dan otomatis.



Gbr. 2 *Road map* IAL siklotron DECY-13 2021-2024.

Penjelasan detail perangkat yang telah terpasang dan status terkini dijelaskan pada Tabel II [15], [21]-[25]. Proses pengujian keempat komponen siklotron tersebut dilakukan secara manual mengikuti manual operasi dari masing-masing komponen. Proses pengujian yang telah dilakukan beberapa kali menghasilkan *standard operating procedure* (SOP) komponen yang digunakan sebagai acuan untuk pengoperasian-pengoperasian selanjutnya.

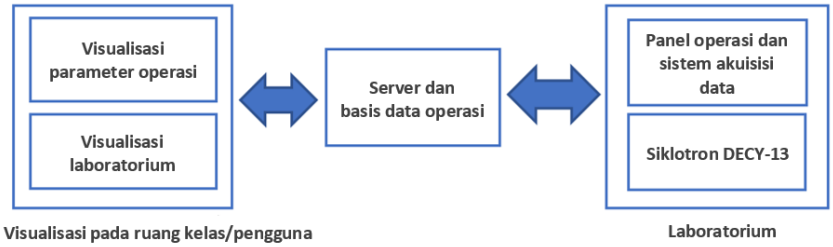
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Konsep Internet Laboratory Siklotron DECY-13*

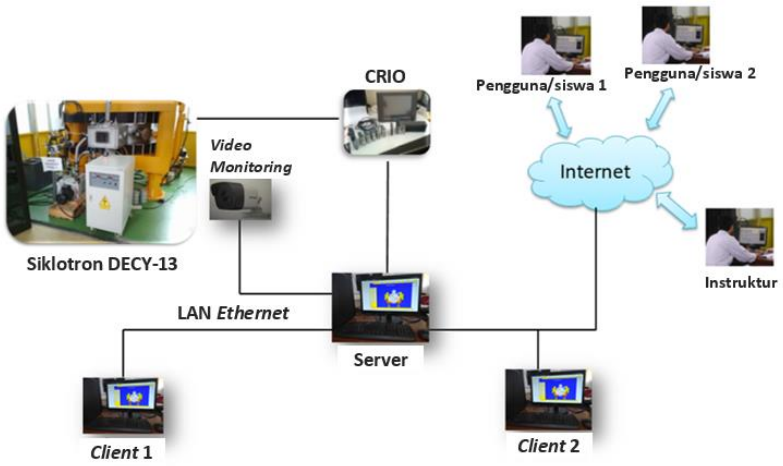
Berdasarkan referensi dari IRL [3], [4], *road map* IAL dapat digambarkan dalam bagan pada Gbr. 2, disesuaikan dengan kondisi laboratorium saat ini dan rencana penyelesaian rancang bangun siklotron di masa depan. Pada tahun 2021, konsep IAL telah selesai dibuat sehingga pada tahun 2022 proses digitalisasi dan integrasi sistem pada siklotron secara bertahap diselesaikan. Termasuk di dalamnya adalah persiapan perangkat internet yang akan digunakan, seperti server, *provider*, dan komponen pendukungnya. Setelah itu, integrasi dengan sistem dan jaringan internet dapat dilakukan di tahun berikutnya sehingga di awal tahun 2024 dapat dilakukan pengujian ke pengguna dan peluncuran produk IAL secara luas ke publik.

Laboratorium siklotron DECY-13 dapat dikategorikan sebagai laboratorium penelitian dan juga perekayasaan (*engineering*) karena di dalamnya terdapat perangkat-perangkat yang didesain dan direkayasa sedemikian rupa untuk memenuhi spesifikasi tertentu. Proses desain dan rekayasa terlebih dahulu diawali dengan kajian dan juga penelitian yang mendalam untuk menghasilkan desain yang optimum.

Kaitannya dengan penerapan IAL pada siklotron DECY-13, hasil studi literatur dan lapangan menghasilkan konsep desain yang didasarkan pada proses penelitian dari masing-masing komponen. Komponen siklotron DECY-13 dibagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok desain komponen dan kelompok



Gbr. 3 Konsep IAL siklotron DECY-13.



Gbr. 4 Dasar arsitektur *online laboratory* siklotron DECY-13.

perangkat operasi. Pembagian ini didasarkan pada proses rancang bangun sampai dengan proses pengujian yang telah dilakukan sampai saat ini.

Kelompok yang pertama yaitu kelompok desain komponen. Tujuh komponen yang telah dijelaskan sebelumnya termasuk dalam kelompok ini. Komponen didesain sesuai persyaratan yang dibutuhkan untuk penggunaan (aplikasi) siklotron, yaitu mempercepat partikel proton sampai 13 MeV untuk produksi radioisotop.

Kelompok kedua, yaitu perangkat operasi, terdiri atas sistem vakum, sistem sumber ion, sistem elektromagnet, sistem generator RF, sistem pemercepat RF, sistem ekstraktor, serta komponen pendukung. Pada kelompok ini, yang dipelajari adalah prinsip kerja alat dan SOP masing-masing komponen. Dari pengelompokan komponen yang ada di perangkat siklotron DECY-13, dapat terlihat kebutuhan materi untuk mendukung pemanfaatan fasilitas IAL. Oleh karena itu, perlu ditentukan detail materi atau silabus yang mendukung pembelajaran tentang sistem dan desain, pelaksanaan operasi, dan perawatan pada masing-masing komponen siklotron.

Detail silabus ditentukan berdasarkan target pengguna IAL ini. Pada kajian ini, pengguna difokuskan pada dua kelompok, yaitu mahasiswa dan operator siklotron. Bagi mahasiswa yang memanfaatkan IAL ini, diharapkan keluaran akhirnya adalah keahlian dalam bidang siklotron, terutama teknologi dan juga aplikasinya pada bidang medis. Sementara itu, operator diharapkan dapat memperoleh keterampilan operasi dan perawatan. Silabus disusun berdasarkan pengalaman penyelenggaraan pelatihan-pelatihan terkait akselerator, baik nasional ataupun regional, yang selama ini telah terlaksana di PRTA. Detail silabus disajikan pada Tabel III di akhir makalah [26].

Selanjutnya, silabus ini digunakan sebagai panduan awal untuk menentukan metode pembelajaran lebih detail dengan memanfaatkan fasilitas IAL yang akan dibuat dan juga untuk menentukan metode pembelajaran yang disesuaikan dengan target pengguna. Secara umum, metode pembelajaran yang digunakan ada dua macam, yaitu penyampaian materi secara klasikal dan praktikum. Untuk penyampaian materi secara klasikal, digunakan media *teleconference* seperti Zoom, Skype, atau aplikasi buatan sendiri. Pada metode klasikal di sini dapat digunakan rekaman video materi yang dapat diakses secara berulang-ulang atau dengan menghadirkan langsung pemateri dalam ruang pembelajaran digital. Sementara itu, praktikum dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pengenalan yang dapat dilakukan secara daring dan tahap eksperimen yang dilakukan secara *blended*, yaitu secara daring dan praktik langsung di lapangan. Pada intinya, o*nline laboratory* memfasilitasi pengguna untuk mengakses suatu laboratorium secara jarak jauh melalui jaringan internet. Dengan telah ditentukannya silabus dan metode, selanjutnya dilakukan penentuan perangkat IAL yang mendukung masing-masing judul dalam silabus.

B. Desain Perangkat Internet Laboratory Siklotron DECY-13 IAL

Pada tahap awal, secara konseptual, *online laboratory* siklotron DECY-13 dapat digambarkan seperti pada diagram dalam Gbr. 3 [27]. Arsitektur yang lebih detail dapat diilustrasikan seperti pada Gbr. 4 [28]. Perangkat utama yang

diperlukan digunakan untuk visualisasi parameter operasi dan perangkat yang ada di laboratorium siklotron melaui jaringan internet. Untuk proses visualisasi melalui jaringan internet, diperlukan server untuk penyimpanan data operasi dan pengolahan web atau aplikasi yang nantinya digunakan. Sistem pada Gbr. 3 terdiri atas CompactRIO sebagai pengendali, server, LAN, internet, *webcam*, dan *website* atau suatu aplikasi untuk diakses oleh pengguna. Visualisasi parameter operasi dapat juga diberikan melalui *website* atau aplikasi yang disediakan.

Dengan kondisi saat ini (seperti yang disajikan pada Tabel I dan Tabel II), yang perlu disiapkan secara mendetail terlebih dahulu adalah perangkat digitalisasi seluruh komponen siklotron di dalamnya, diantaranya penyiapan sistem untuk *user interface* skala laboratorium dan proses pembuatan basis data operasi. Setelah itu, baru dilakukan penentuan perangkat teknologi informasi (TI) yang akan digunakan, seperti server, jaringan internet, dan segala perangkat pendukungnya. Pembuatan *user interface* skala lab juga mempertimbangkan agar parameter-parameter operasi penting dapat diakses melalui jaringan internet dan tampilannya dapat dengan mudah dipahami oleh pengguna IAL.

Terkait visualisasi kepada pengguna, dapat digunakan *webcam* untuk mengetahui kondisi secara langsung di laboratorium, dengan harapan proses pemahaman materi dapat diperoleh secara menyeluruh. Berdasarkan referensi dan praktik yang telah diterapkan oleh IRL untuk proses interaktif, pengguna dapat memberikan masukan parameter operasi melalui suatu aplikasi untuk selanjutnya dieksekusi oleh operator siklotron di lapangan [3].

IV. KESIMPULAN

Dari desain konseptual yang berhasil disusun pada kajian ini diperoleh beberapa hal, di antaranya *road map* pembuatan fasilitas *internet laboratory*, status komponen-komponen pada siklotron DECY-13, silabus untuk dua pengguna mahasiswa dan operator siklotron, dan identifikasi komponen IAL yang digunakan. Dalam jangka panjang, cakupan pengguna dapat diperluas untuk beberapa bidang penelitian yang terkait siklotron. Pada dasarnya, teknologi IAL ini dibuat untuk mengikuti perkembangan zaman, terutama berkaitan dengan peningkatan kapasitas SDM bidang nuklir di Indonesia.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam penulisan makalah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konsep dasar dan studi literatur utama, Frida Iswinning Diah, Idrus Abdul Kudus; *road map* dan studi literatur pendukung, Fajar Sidik Permana; pendalaman tentang kondisi terkini siklotron DECY-13, Suharni; pendalaman tentang internet laboratory, Taxwim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada saudari Emy Mulyani yang telah membimbing penulisan KTI ini dan juga pada segenap tim siklotron DECY-13 PRTA ORTN-BRIN.

REFERENSI

[1] N.S. Risdianto, J. Purwanto, dan F.A. Rahmadi, "The Use of Cyclotron for PET/CT Scan in Indonesian Hospitals and Future Collaboration," *Proc. IPAC2016*, 2016, hal 1911-1913.

[2] (2019) "Penyakit Kanker di Indonesia Berada pada Urutan 8 di Asia Tenggara dan Urutan 23 di Asia." [Online], http://p2p.kemkes.go.id/penyakit-kanker-di-indonesia-berada-pada-urutan-8-di-asia-tenggara-dan-urutan-23-di-asia/, tanggal akses: 21-Mei-2021.

[3] S. Syarip, dkk., "Development of Internet Reactor Laboratory Using Kartini Reactor for Training and Education," *Electr. Power, Electron. Commun. Control. Inform. Semin. (EECCIS 2018)*, 2018, hal. 411–414.

[4] Taxwim, dkk., "Strengthening Scientific Literacy on Nuclear Reactor and Its Application Through Nuclear School," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1175, No. 1, hal. 1–7, 2019.

[5] L.D. Feisel dan A.J. Rosa, "The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education," *J. Eng. Educ.*, Vol. 94, No. 1, hal. 121–130, 2005.

[6] A. Chevalier, dkk., "Development and Student Evaluation of an Internet-based Control Engineering Laboratory," *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 48, No. 29, hal. 1–6, 2015.

[7] J.A. Alamo, dkk., "An Online Microelectronics Device Characterization Laboratory with a Circuit-like User Interface," *Int. Conf. Eng. Educ.*, 2003, hal. 1–7.

[8] A. Ballu, dkk., "Virtual Metrology Laboratory for e-Learning," *Procedia CIRP*, Vol. 43, hal. 148–153, 2016.

[9] A. Cestaprabha, A. Abimanyu, J. Sunardi, dan A.D. Atmaja, "Pengembangan Virtual Akselerator Sistem Magnet Development of Experimental Cyclotron Yogyakarta-13 (DECY-13) Berbasis Android," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2018, hal. 245–250.

[10] H. Chowdhury, F. Alam, dan I. Mustary, "Development of an Innovative Technique for Teaching and Learning of Laboratory Experiments for Engineering Courses," *Energy Procedia*, Vol. 160, , hal. 806–811, 2019.

[11] G.J. Wiener, J. Woithe, A. Brown, dan K. Jende, "Introducing The LHC in the Classroom: An Overview of Education Resources Available," *Phys. Educ.*, Vol. 51, No. 3, hal. 1-7, 2016.

[12] N. Delerue, dkk., "A Massive Open Online Course on Particle Accelerators," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1067, No. 9, hal. 512–515, 2018.

[13] (2021) "Courses, Materials & Instructors." [Online], https://uspas.fnal.gov/materials/materials-table.shtml, tanggal akses: 9-Nov-2021.

[14] F.I. Diah, dkk., "Evaluation of Hydrogen Gas Flow System in DECY - 13 Cyclotron," *J. Phys.: Conf. Series*, Vol. 1825, hal. 1-7, 2021.

[15] 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, No. 1, hal. 1-7, 2018.

[16] I.A. Kudus, Taufik, dan K. Wibowo, "Alignment Sistem Mapping untuk Magnet Siklotron DECY-13," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2016, hal. 198–203.

[17] Taufik, K. Wibowo, I.A. Kudus, dan F.S. Permana, "Magnetic Field Analysis of Shimmed DECY-13 Cyclotron Magnet," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2381, No. 1, Nov. 2021, paper 020102.

[18] F.S. Permana, N. Effendy, dan A.N.I. Wardhana, "Perancangan dan Identifikasi Kendali PID pada Aliran Hidrogen Sumber Ion Siklotron DECY-13," *J. Iptek Nuklir Ganendra*, Vol. 21, No. 2, hal. 59–66, Jul. 2021.

[19] K. Wibowo dan Silakhuddin, "Pengujian Awal Perangkat-Perangkat Siklotron DECY - 13," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2018, hal. 355–358.

[20] S. Silakhuddin, R.S. Darmawan, S. Suharni, dan I.A. Kudus, "Characterization on DECY-13 Cyclotron Components," *Phys. J.*, Vol. 3, hal. 64–72, 2019.

[21] 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.

[22] 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. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2016, hal. 186–192.

[23] F.S. Permana dan Suharni, "Sistem Akuisisi Data Sumber Daya Magnet MPS 8500 dan Karakterisasinya untuk Pengoperasian Siklotron DECY-13," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2018, hal. 197–202.

[24] F.S. Permana, A.D. Atmojo, dan A. Wijayanto, "Perancangan Sistem Akuisisi dan Kendali Generator RF Siklotron DECY-13," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2018, hal. 115–118.

[25] Saefurrachman, Saminto, dan A. Susanto, "Analisis Perancangan Sistem Instrumentasi Perangkat Pengatur Posisi Sumber Ion DECY-13," *Pros. Pertemuan Presentasi Ilm. Penelit. Dasar Ilmu Pengetahuan Teknol. Nuklir*, 2018, hal. 369–376.

[26] CAS Team (2016) "Syllabus and Conventions for General Courses organized by the CERN Accelerator School," [Online], https://cas.web.cern.ch/sites/default/files/CASSyllabus.pdf, tanggal akses: 9-Nov-2021.

[27] A. Leleve, H. Benmohamed, P. Prevot, dan C. Meyer, "Remote Laboratory Towards an Integrated Training System," *4th Int. Conf. Inf. Technol. Based Higher Educ. and Training (ITHET 2003)*, 2003, hal. 1-6.

[28] A. Salihbegovic dan S. Ribic, "Development of Online Internet Laboratory (Online I-Lab)," dalam *Innovative Techniques in Instruction Technology, E-learning, E-assessment, and Education*, M. Iskander, Ed., Dordrecht, Belanda: Springer, 2008, hal. 1-6.

TABEL III
SILABUS IAL SIKLOTRON 13 MEV

Pengguna / **Keterangan**	**Mahasiswa**	**Operator**
Pendahuluan		
Basic	1. Dasar akselerator 2. Aplikasi akselerator 3. Fisika akselerator 4. Teknologi siklotron 5. Aplikasi siklotron di bidang medis	
Advanced [26]	1. *Mathematics for accelerators* 2. *Electromagnetic theory* 3. *Particle motion in EM fields* 4. *Relativity and kinematics of particle beams*	
Sistem Sumber Ion		
Basic	1. Prinsip kerja sistem sumber ion 2. Jenis-jenis sumber ion 3. Komponen pada sistem sumber ion 4. SOP operasi dan perawatan sumber ion	
Advanced	Dasar-dasar desain komponen sumber ion	Praktikum operasi dan perawatan sumber ion
Sistem Magnet		
Basic	1. Prinsip kerja sistem magnet 2. Komponen pada sistem magnet 3. SOP operasi dan perawatan sistem magnet	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem magnet	Praktikum operasi dan perawatan sistem magnet
Sistem Vakum		
Basic	1. Prinsip kerja sistem vakum 2. Komponen pada sistem vakum 3. SOP operasi dan perawatan sistem magnet	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem vakum	Praktikum operasi dan perawatan sistem vakum
Sistem Generator Radio Frequency (RF)		
Basic	1. Prinsip kerja sistem generator RF 2. Komponen pada sistem generator RF 3. SOP operasi dan perawatan sistem generator RF	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem generator RF	Praktikum operasi dan perawatan sistem generator RF
Sistem RF Pemercepat		
Basic	1. Prinsip kerja sistem RF pemercepat 2. Komponen pada sistem RF pemercepat 3. SOP operasi dan perawatan sistem RF pemercepat	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem RF pemercepat	Praktikum operasi dan perawatan sistem RF pemercepat

TABEL III (LANJUTAN)
SILABUS IAL SIKLOTRON 13 MEV

Pengguna / Keterangan	Mahasiswa	Operator
Sistem Pengukur Berkas		
Basic	1. Prinsip kerja sistem pengukur berkas 2. Komponen pada sistem pengukur berkas 3. SOP operasi dan perawatan sistem pengukur berkas	
Advanced	*Beam instrumentation and diagnostics*	Praktikum operasi dan perawatan sistem pengukur berkas
Sistem Ekstraktor		
Basic	1. Prinsip kerja sistem ekstraktor 2. Komponen pada sistem ekstraktor 3. SOP operasi dan perawatan sistem ekstraktor	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem ekstraktor	Praktikum operasi dan perawatan sistem ekstraktor
Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK)		
Basic	1. SIK pada siklotron DECY-13 2. Prinsip kerja SIK di masing-masing komponen	
Advanced	Dasar-dasar desain SIK siklotron	Praktikum operasi dan perawatan SIK
Sistem Utilitas		
Basic	1. Sistem utilitas pada siklotron DECY-13 2. Prinsip kerja sistem utilitas DECY-13	
Advanced	Dasar-dasar desain sistem utilitas	Praktikum operasi dan perawatan sistem utilitas