

**PERANCANGAN DAN KONSTRUKSI FASILITAS PRODUKSI RADIOISOTOP F-18 BERBASIS SIKLOTRON: ASPEK TEKNIK, KEAMANAN, DAN KEPATUHAN REGULASI****DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CYCLOTRON-BASED F-18 RADIOISOTOPE PRODUCTION FACILITY: TECHNICAL, SAFETY, AND REGULATORY COMPLIANCE ASPECTS****Agnia Sulastri Anwar**

Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - BRIN, Jl. Babarsari POB 6101 YKBB, Yogyakarta, Indonesia 55281

[agnia5779@gmail.com](mailto:agnia5779@gmail.com)**ABSTRAK**

Penggunaan teknologi siklotron dalam produksi radioisotop medis seperti fluor-18 (F-18) semakin penting dalam mendukung layanan kesehatan berbasis kedokteran nuklir, terutama untuk kebutuhan diagnostik pencitraan pet (positron emission tomography). Studi ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi desain fasilitas produksi radioisotop F-18 berbasis siklotron 13 MeV dengan mempertimbangkan aspek teknis, keselamatan radiasi, dan kepatuhan terhadap regulasi nasional serta standar internasional. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur dengan pendekatan deskriptif-kualitatif, mencakup analisis desain ruangan dan utilitas siklotron. Hasil menunjukkan bahwa desain tata letak yang menempatkan ruang siklotron di bawah tanah, pemanfaatan shielding kombinasi beton dan timbal, serta penerapan sistem pemantauan real-time dan kontrol akses terintegrasi, mampu menekan risiko paparan radiasi dan memenuhi ketentuan IAEA GSR part 3, IAEA SSG-8, serta PERKA BAPETEN No. 6 tahun 2019. Kajian ini memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan fasilitas radiofarmaka nasional yang aman, efisien, dan sesuai regulasi.

**Kata kunci:** Fluor-18, siklotron 13 MeV, proteksi radiasi, perancangan fasilitas, BAPETEN, IAEA.

**ABSTRACT**

The use of cyclotron technology for the production of medical radioisotopes such as fluorine-18 (F-18) has become increasingly important in supporting nuclear medicine-based healthcare services, particularly for diagnostic needs in positron emission tomography (PET) imaging. This study aims to design and evaluate a radioisotope production facility utilizing a 13 MeV cyclotron, taking into account technical aspects, radiation safety, and compliance with national regulations and international standards. The methodology employed is a literature study using a descriptive-qualitative approach, covering analysis of room layout and cyclotron utilities. The results show that a layout placing the cyclotron room underground, the use of combined concrete and lead shielding, and the implementation of integrated real-time monitoring and access control systems are effective in minimizing radiation exposure risks and comply with IAEA GSR Part 3, IAEA SSG-8, and BAPETEN Regulation No. 6 of 2019. This study makes a tangible contribution to the development of safe, efficient, and regulation-compliant national radiopharmaceutical facilities.

**Keywords:** Fluorine-18, 13 MeV cyclotron, radiation protection, facility design, BAPETEN, IAEA.

**Article History**

Received: Juli 2025

Reviewed: Juli 2025

Published: Juli 2025

Plagiarism Checker No 687

Prefix DOI : Prefix DOI :

10.8734/Kohesi.v1i2.365

**Copyright : Author****Publish by : Kohesi**

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



## PENDAHULUAN

Radioisotop merupakan bahan/ zat yang memiliki peran penting dalam berbagai bidang, salah satunya di sektor kesehatan untuk pencitraan medis dan terapi. Radioisotop dapat diproduksi dengan beberapa metode/ alat, salah satunya adalah siklotron [1]. Siklotron sebagai salah satu jenis akselerator partikel, memiliki mekanisme kerja dimana partikel bermuatan dipercepat dengan lintasan melingkar di dalam medan magnet. Teknologi ini memungkinkan produksi radioisotop dengan waktu paruh pendek, seperti Fluor-18 (F-18) yang digunakan dalam pencitraan Positron Emission Tomography (PET) [2]. Siklotron sebagai salah satu teknologi utama dalam produksi radioisotop telah berkembang pesat, terutama dalam penyediaan radioisotop dengan waktu paruh pendek yang sangat diperlukan dalam aplikasi klinis.

Sejak tahun 2009, PTAB-BATAN telah aktif melakukan penelitian dan pengembangan teknologi siklotron untuk mendukung berbagai aplikasi di bidang kesehatan, seperti produksi radioisotop untuk diagnostik dan terapi penyakit, terutama kanker. Radioisotop yang dapat diproduksi dengan siklotron, antara lain: Fluor-18, Carbon-11, dan Iodine-123 yang digunakan luas dalam bidang kedokteran nuklir untuk teknik pencitraan seperti Positron Emission Tomography (PET) dan Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) [3]. Selain itu, radioisotop ini juga digunakan dalam penelitian biomedis, industri, dan pertanian. Dalam dekade terakhir, terjadi peningkatan permintaan terhadap radioisotop, sehingga diperlukan pengembangan fasilitas produksi yang efisien dan aman [4].

Desain fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron harus mempertimbangkan beberapa faktor utama, di antaranya pemilihan energi akselerator, pengendalian radiasi, perlindungan lingkungan, serta pengelolaan limbah radioaktif. Siklotron dengan energi 10-30 MeV umumnya digunakan untuk produksi radioisotop medis, di mana pemilihan energi yang optimal bergantung pada jenis target dan isotop yang akan diproduksi [5].

Dalam konteks regulasi, pengembangan, pembangunan, dan pengoperasian fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron harus memenuhi standar nasional dan internasional. Di tingkat nasional, regulasi yang berlaku di Indonesia mencakup Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2019 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi, yang mengatur aspek keselamatan radiasi dalam penggunaan sumber radiasi pengion. Selain itu, terdapat Peraturan BAPETEN No. 2 Tahun 2022 tentang Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir, yang mencakup prosedur perizinan untuk fasilitas yang menggunakan bahan nuklir, termasuk siklotron. Di samping itu, Perka BAPETEN No. 1 Tahun 2010 tentang Keamanan Fasilitas dan Bahan Nuklir juga memberikan panduan tentang langkah-langkah keamanan fisik untuk melindungi fasilitas dari akses ilegal dan ancaman eksternal.

Di tingkat internasional, standar yang diterapkan mengacu pada pedoman dari International Atomic Energy Agency (IAEA), seperti IAEA General Safety Requirements (GSR) Part 3 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi, yang memberikan pedoman mengenai batas dosis radiasi, sistem proteksi, serta pemantauan paparan radiasi bagi pekerja dan masyarakat. Selain itu, IAEA Safety Guide SSG-8 tentang Keselamatan Siklotron mencakup aspek desain, konstruksi, pengoperasian, serta dekomisioning fasilitas siklotron untuk memastikan standar keselamatan terpenuhi. Selain itu terdapat juga rekomendasi dari International Commission on Radiological Protection (ICRP) yang juga menjadi acuan utama dalam memastikan proteksi radiasi terhadap pekerja dan lingkungan [6].

Dari semua hal diatas, maka dilakukanlah kajian untuk dapat menyusun perancangan dan konstruksi fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron yang sesuai dengan standar teknis dan regulasi yang berlaku. Pendekatan yang digunakan mencakup tinjauan terhadap persyaratan desain, implementasi sistem keselamatan, serta strategi pemenuhan regulasi nasional dan internasional dalam operasional fasilitas. Dengan demikian, hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang komprehensif bagi pengembangan fasilitas produksi radioisotop yang aman, efisien, dan berkelanjutan.



## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur yang dipadukan dengan pengumpulan data lapangan, serta dianalisis secara kualitatif deskriptif. Studi literatur dilakukan dengan menelusuri berbagai sumber yang relevan, termasuk jurnal ilmiah, tesis, prosiding seminar, serta berita dari media daring, tanpa membatasi tahun penerbitan maupun institusi yang menerbitkan. Pengumpulan data lapangan dilaksanakan melalui observasi langsung ke ruangan siklotron DECY-13 yang berlokasi di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) Ahmad Baiquni, guna memastikan relevansi data dengan topik yang dikaji. Selain itu, proses dokumentasi dan visualisasi tata letak fasilitas dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Visio.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

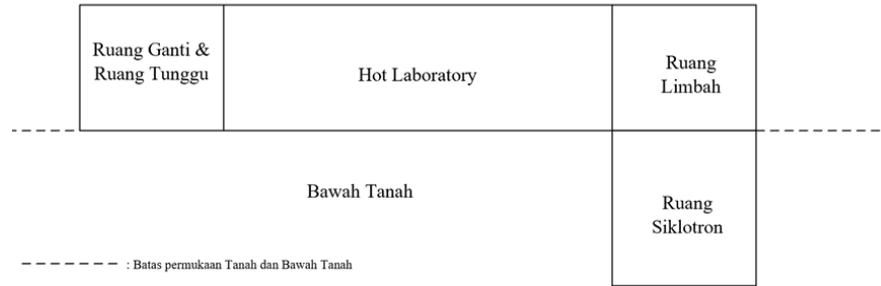
### A. SIKLOTRON

Akselerator partikel merupakan perangkat yang digunakan untuk memberikan energi kinetik tinggi kepada partikel bermuatan, seperti proton, deuteron, atau ion lainnya, dengan tujuan mempercepatnya hingga mencapai energi yang cukup untuk menyebabkan reaksi inti ketika menumbuk target tertentu. Teknologi akselerator memainkan peranan krusial dalam berbagai bidang, termasuk fisika partikel, kedokteran nuklir, serta produksi radioisotop untuk aplikasi diagnostik dan terapeutik [7]. Secara umum, akselerator diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu akselerator linier (*linac*) dan akselerator melingkar. Akselerator linier mempercepat partikel dalam lintasan lurus dengan menggunakan serangkaian struktur resonator, sedangkan akselerator melingkar, seperti siklotron dan sinkrotron, memanfaatkan medan magnet untuk membelokkan lintasan partikel sehingga dapat mengalami percepatan berulang dalam ruang terbatas [8]. Dalam konteks produksi radioisotop medis, siklotron menjadi pilihan utama karena mampu menghasilkan proton berenergi rendah hingga menengah (5-30 meV), cukup untuk memicu reaksi nuklir seperti  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  yang digunakan dalam produksi radiofarmaka berbasis Fluor-18, seperti FDG (*fluorodeoxyglucose*), yang merupakan salah satu tracer utama dalam teknik pencitraan PET (*Positron Emission Tomography*) [9].

Radioisotop Fluor-18 umumnya diproduksi menggunakan siklotron dengan energi 13 MeV karena dataampang lintang reaksi (*cross-section*) untuk produksi F-18 berada pada puncaknya di sekitar 7 MeV dan masih signifikan hingga sekitar 13 MeV [10]. Kondisi seperti itu membuat siklotron 13 MeV mampu memberikan keseimbangan antara efisiensi reaksi dan kendali terhadap radiasi yang dihasilkan. Pada perancangan fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron kali ini, siklotron yang digunakan adalah siklotron dengan merk DECY-13. Siklotron ini dioperasikan dengan arus proton 30  $\mu\text{A}$  dan proses iradiasi dilakukan selama 40 menit. Proses ini menghasilkan F-18 dengan aktivitas 1223 mCi. Nilai ini telah dikonfirmasi valid melalui perbandingan dengan standar IAEA dan data produksi di rumah sakit di Jakarta dengan selisih kurang dari 5% [11].

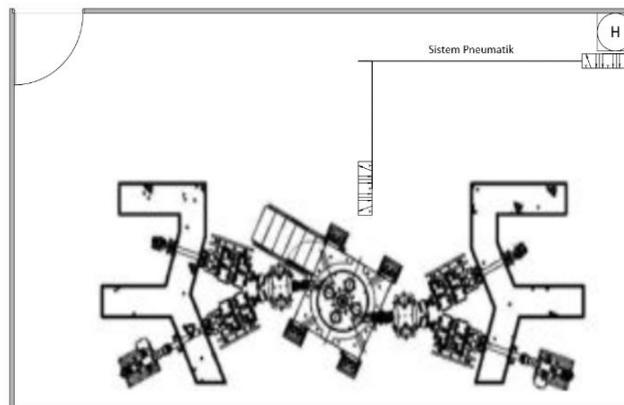
### B. DESAIN FASILITAS PRODUKSI

Operasional fasilitas produksi radiofarmaka harus mempertimbangkan keamanan, keselamatan pasien, personel dan lingkungan sehingga aspek keamanan dan proteksi radiasi diintegrasikan secara menyeluruh dalam desain dan pengelolaan fasilitas. Namun, disaat yang bersamaan juga diinginkan konstruksi dengan biaya serendah mungkin [12]. Berdasarkan pertimbangan diatas, maka desain fasilitas kali ini adalah seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Desain Fasilitas dalam 2D dari samping.

Pada gambar 1 terlihat bahwa ruang siklotron ada dibawah tanah dan tepat di atasnya hanya ada ruang limbah. Desain yang seperti ini dipilih dengan pertimbangan agar dinding ruang siklotron dapat dibangun dengan kondisi/konstruksi seperti dinding bangunan biasa sehingga biaya konstruksi dapat ditekan. Meski hanya dinding biasa, desain seperti ini tetap dapat memenuhi aspek keamanan dan proteksi radiasi karena disekitarnya (samping dan bawah ruang siklotron) tidak ada orang. Selain itu, tanah juga berperan sebagai *shielding* alami karena massa tanah dapat digunakan sebagai pelindung pasif di sekeliling sumber radiasi [13]. Sementara itu, untuk bagian atasnya hanya ruang limbah yang dilengkapi dengan interlock (pintu masuk akan terkunci jika siklotron beroperasi) dan tidak setiap hari ada orang yang masuk. Adapun untuk desain bagian dalam ruang siklotron terlihat seperti gambar 2.



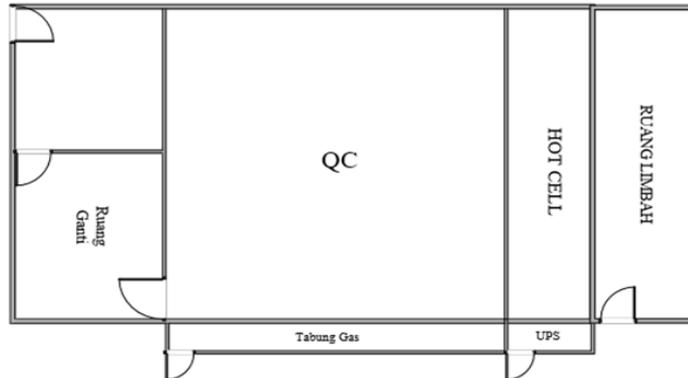
Gambar 2. Desain bagian dalam ruang siklotron secara 2D (tampak dari atas)

Pada gambar 1 juga terlihat ada ruang tunggu dan Hot Laboratory. Ruang tunggu dan ruang ganti merupakan ruangan yang bebas dari potensi kontaminasi dan memiliki laju dosis yang rendah sejalan dengan pedoman IAEA yang menyebutkan bahwa area dengan akses terbuka (seperti ruang tunggu) harus memiliki laju dosis radiasi di bawah  $0,5 \mu\text{Sv}/\text{jam}$  untuk menjamin keselamatan personel [14]. Ruang tunggu adalah ruang dimana pengawas atau personel yang berwenang menunggu untuk diizinkan masuk ke dalam laboratorium atau setidaknya dapat memantau kegiatan di dalam laboratorium dengan aman. Sementara itu, ruang ganti merupakan ruangan dimana personel/petugas laboratorium berganti pakaian, mengenakan APD, dan sebagai ruang transit untuk keluar masuk hot laboratory. Peletakan dua ruangan ini jauh dari ruang limbah dan ruang siklotron dimaksudkan agar laju paparan/ laju dosis di dua ruangan tersebut kecil. Hal ini didasarkan teori bahwa laju dosis radiasi akan menurun seiring bertambahnya jarak lokasi dari pusat radiasi, yaitu :

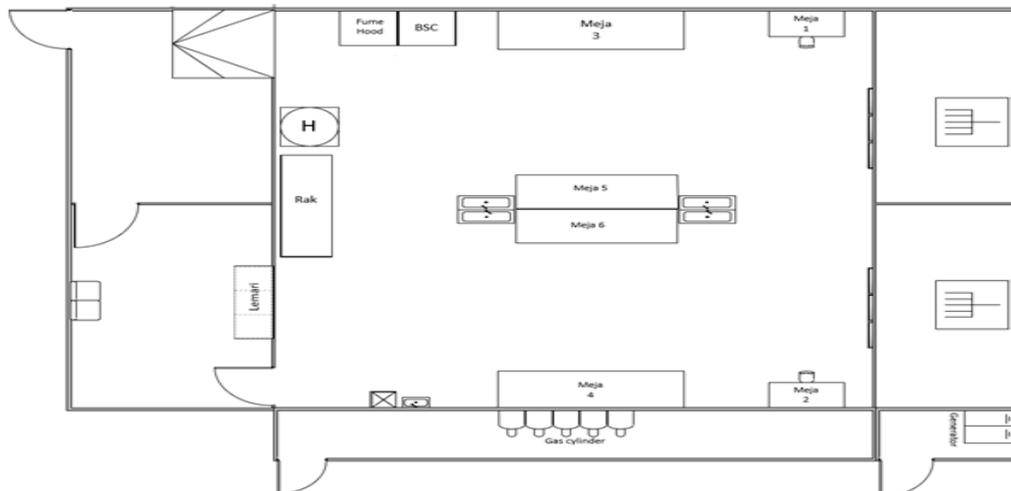
$$D = \frac{D_0}{r^2}$$

di mana D adalah laju dosis pada jarak r, dan  $D_0$  adalah laju dosis pada jarak referensi. Dengan demikian, penempatan ruang tunggu dan ruang ganti yang lebih jauh dari pusat sumber radiasi (misalnya Hot Cell) akan secara signifikan mengurangi laju dosis yang diterima personel [14].

Sementara itu, Hot laboratorium merupakan laboratorium yang di dalamnya ada Hot cell yang merupakan ruang tertutup yang terlindungi oleh penampang (shielding) untuk menangani material radioaktif, sangat umum digunakan dalam produksi radiofarmaka serta penelitian radiokimia [15]. Selain ada Hot Cell, didalam Hot laboratorium juga terdapat laboratorium umum yang terdiri dari berbagai macam peralatan untuk pengujian kualitas radiofarmaka yang disintesis di dalam Hot Cell [16]. Desain hot laboratorium secara umum dapat dilihat pada gambar 3 dan secara spesifik ada pada gambar 4.



Gambar 4. Desain fasilitas tampak dari atas (Hot laboratorium: QC + Hot Cell)



**Keterangan**

-  : Wastafel
-  : Shower + Eyewash
-  : Biosafety Cabinet
-  : Kaca dengan campuran timbal
-  : Kursi
-  : Kaca dengan campuran timbal

Gambar 5. Desain Hot Laboratory secara detail



Gambar 5 menunjukkan bahwa di dalam hot laboratory terdapat beberapa meja. Meja - meja ini memiliki fungsi masing-masing dan dalam peletakannya mempertimbangkan fleksibilitas personel tanpa melupakan aspek keselamatan dan proteksi radiasi [17]. Meja 1 dan meja 2 hanya berisi komputer yang digunakan untuk membuat program/setingan alat (Automated Synthesizer) yang akan mensintesis radioisotop F-18 menjadi radiofarmaka [18]. Proses penyetelan ini dilakukan di awal sebelum alat beroperasi/ radioisotope masuk ke hot cell sehingga personel akan aman dari bahaya radiasi. Kemudian meja 3 dan meja 4 merupakan meja yang berisi instrumentasi untuk melakukan pengujian kemurnian radiofarmaka yang dihasilkan. Instrumentasi disini meliputi *high performance liquid chromatography* (HPLC) dan *gas chromatography* (GC) [19]. Sementara itu meja 5 dan meja 6 merupakan meja yang digunakan untuk melakukan preparasi - preparasi terkait pengujian yang akan dilakukan sehingga ditempatkan di tengah.

Meja 3 sampai dengan meja 6 diletakkan jauh dari hot cell karena di meja - meja ini personel banyak beraktivitas/ melakukan pengujian. Peletakan meja yang jauh dari hotcell dilakukan untuk meminimalisir paparan radiasi yang diterima personel [20]. Selain instrumentasi penguji kemurnian radiofarmaka, di dalam laboratorium juga terdapat detektor yang digunakan untuk melakukan kalibrasi dosis terhadap radiofarmaka. Kalibrasi dosis perlu dilakukan untuk menjamin keamanan dan keselamatan pasien yang menggunakan radiofarmaka [21]. Laboratorium ini juga dilengkapi dengan utilitas-utilitas pendukung pengujian seperti bio-safety cabinet, wastafel, fume hood, dan rak bahan.

Selain utilitas pendukung pengujian, fasilitas produksi radiofarmaka ini juga didukung oleh alat-alat yang menjamin keamanan, keselamatan masyarakat dan lingkungan dari bahaya radiasi. Alat-alat tersebut diantaranya adalah monitor area, wall body counter, sistem ventilasi dan filtrasi ganda (HEPA serta karbon aktif), serta peralatan pengamanan fasilitas seperti: kontrol; akses elektronik; CCTV; dan sistem alarm. Sistem ventilasi dengan tekanan negatif dan filtrasi ganda (HEPA serta karbon aktif) digunakan untuk mencegah penyebaran kontaminasi udara radioaktif sehingga fasilitas ini memenuhi ketentuan PERBA BAPETEN No. 6 Tahun 2020 [22]. Sementara itu, pengamanan fisik fasilitas melalui kontrol akses elektronik, CCTV, dan sistem alarm mengikuti standar Perka BAPETEN No. 1 Tahun 2010 [23].

Peletakan ruangan dan alat-alat seperti diatas sudah cukup untuk memastikan personel aman dari bahaya radiasi. Namun untuk lebih amannya, khususnya untuk masyarakat dan lingkungan, maka tembok yang berada di atas tanah semua menggunakan beton densitas tinggi. Kemudian untuk lokasi yang memang memiliki laju dosis tinggi (hotcell), dindingnya masih dilapisi oleh timbal dan untuk kaca yang memisahkan hotcell dengan laboratorium pengujian juga mengandung timbal.

Selain melalui tata letak ruang dan sistem keamanan aktif, perlindungan terhadap radiasi sangat bergantung pada penggunaan material fisik yang tepat. Beton densitas tinggi (high-density concrete) umum digunakan karena memiliki densitas antara 2,2-3,5 g/cm<sup>3</sup> dan mampu meredam radiasi gamma dan neutron secara efisien; hal ini membuatnya material pilihan di berbagai fasilitas nuklir dan laboratorium radiofarmaka [24]. Beton bekerja melalui mekanisme pelemahan (attenuation), di mana energi radiasi dipengaruhi oleh komposisi dan ketebalan material.

Untuk area berisiko sangat tinggi seperti hotcell, digunakan lapisan timbal tambahan. Timbal memiliki nomor atom tinggi ( $Z = 82$ ) dan densitas besar ( $\sim 11,34 \text{ g/cm}^3$ ), yang membuatnya sangat efektif mereduksi sinar gamma dan X-ray. Sebagai ilustrasi, lapisan setengah-nilai atau HVL (half-value layer) timbal untuk radiasi Co-60 adalah sekitar 12,5 mm, sedangkan HVL beton untuk sumber yang sama mencapai sekitar 60 mm. Dengan demikian, kombinasi beton dan timbal menghasilkan pelindung radiasi yang optimal—beton menurunkan intensitas awal secara signifikan, sementara timbal memberikan pengurangan tambahan dalam ketebalan minimal [25].



### C. Kepatuhan Terhadap Regulasi

Untuk menjamin keselamatan operasional, aspek keamanan dan proteksi radiasi diintegrasikan secara menyeluruh dalam desain dan pengelolaan fasilitas. Pertama, perisai radiasi (shielding) dari beton densitas tinggi dan timbal dirancang berdasarkan simulasi Monte Carlo atau perhitungan untuk meredam paparan gamma dan neutron guna memastikan tingkat radiasi di luar fasilitas berada di bawah batas aman sesuai panduan IAEA SSG-8 (2010) [26]. Kedua, sistem ventilasi dengan tekanan negatif dan filtrasi ganda (HEPA serta karbon aktif) untuk mencegah penyebaran kontaminasi udara radioaktif, sejalan dengan ketentuan PERBA BAPETEN No. 6 Tahun 2020 [22]. Ketiga, pemantauan dosis dilakukan secara real-time menggunakan Area Radiation Monitoring System (ARMS), dan setiap pekerja dibekali dosimeter pribadi (TLD dan Dosimeter personal) untuk akumulasi dosis, sebagaimana diatur dalam IAEA GSR Part 3 [27]. Keempat, pengamanan fisik fasilitas dijalankan melalui kontrol akses elektronik, CCTV, dan sistem alarm yang mengikuti standar Perka BAPETEN No. 1 Tahun 2010 [23], dilengkapi dengan prosedur tanggap darurat termasuk evakuasi dan dekontaminasi. Kelima, pelatihan keselamatan radiasi diwajibkan secara berkala untuk seluruh personel, serta penerapan budaya keselamatan (safety culture) ditekankan guna mendorong pelaporan insiden dan perbaikan berkelanjutan [6]. Semua upaya ini diarahkan untuk menjamin kepatuhan terhadap batas dosis radiasi: maksimal 20 mSv/tahun rata-rata lima tahun untuk pekerja radiasi, atau 50 mSv pada satu tahun tertentu, serta 1 mSv/tahun untuk masyarakat umum [22].

Sejalan dengan peraturan nasional tersebut, pedoman dan standar internasional dari International Atomic Energy Agency (IAEA) serta International Commission on Radiological Protection (ICRP) juga menjadi rujukan penting. Salah satu pedoman utama adalah IAEA GSR Part 3 (2014) yang mengatur sistem perlindungan radiasi berdasarkan prinsip justifikasi, optimisasi, dan pembatasan dosis [20]. Dalam dokumen tersebut disebutkan bahwa batas dosis efektif tahunan untuk pekerja radiasi adalah rata-rata 20 mSv selama lima tahun berturut-turut, dengan batas maksimum 50 mSv dalam satu tahun tertentu, sedangkan untuk masyarakat umum dibatasi pada 1 mSv per tahun. Standar ini diadopsi secara eksplisit dalam Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2019 dan menjadi dasar dalam perancangan proteksi terhadap personel dan publik di fasilitas siklotron [28].

Desain fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron 13 MeV yang ditinjau dalam kajian ini telah mengintegrasikan pendekatan teknis dan regulatif secara menyeluruh. Penggunaan beton densitas tinggi sebagai material perisai radiasi utama dipilih berdasarkan hasil studi Jumpeno et al. (2020), yang menunjukkan bahwa beton tipe K-500 dengan kepadatan tinggi efektif dalam menahan radiasi gamma dan neutron yang dihasilkan selama iradiasi target [29]. Selain itu, penggunaan timbal sebagai lapisan tambahan pada dinding hotcell serta kaca timbal untuk pengamatan dari luar turut memperkuat efektivitas sistem shielding, sekaligus memenuhi rekomendasi keselamatan dari IAEA SSG-8 [11].

Selain proteksi struktural, sistem ventilasi dalam fasilitas ini dirancang menggunakan tekanan negatif dengan filtrasi ganda berupa HEPA filter dan karbon aktif. Sistem ini bertujuan untuk mencegah penyebaran kontaminan radioaktif ke lingkungan luar dan dioperasikan sesuai ketentuan PERBA BAPETEN No. 6 Tahun 2020 [22]. Seluruh ruang pengujian radiofarmaka juga dilengkapi dengan monitor area dan pemantauan dosis real-time melalui Area Radiation Monitoring System (ARMS). Setiap pekerja dibekali dengan dosimeter pribadi seperti Thermoluminescent Dosimeter (TLD), guna mencatat akumulasi dosis individu sesuai ketentuan IAEA GSR Part 3 dan protokol pemantauan dosis yang direkomendasikan oleh Johnson et al [30].

Aspek keamanan fisik juga menjadi bagian integral dari kepatuhan regulasi. Fasilitas dilengkapi dengan kontrol akses elektronik, sistem CCTV, serta sistem alarm yang diatur dalam Perka BAPETEN No. 1 Tahun 2010 [23]. Prosedur tanggap darurat juga disiapkan, mencakup skenario evakuasi dan proses dekontaminasi, untuk menjamin kesiapsiagaan menghadapi insiden radiasi. Selain itu, pelatihan keselamatan radiasi secara berkala diwajibkan bagi seluruh



personel fasilitas untuk memastikan pemahaman dan kompetensi terhadap risiko radiasi tetap terjaga. Penanaman budaya keselamatan (*safety culture*) ditegaskan sebagai bagian dari strategi pengelolaan risiko, sebagaimana diuraikan dalam ICRP Publication 103, guna mendorong pelaporan insiden, refleksi operasional, dan peningkatan berkelanjutan [6].

## KESIMPULAN

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, kombinasi penempatan ruang siklotron di bawah permukaan tanah, penggunaan beton densitas tinggi dan timbal sebagai perisai radiasi, serta implementasi sistem ventilasi bertekanan negatif dan sistem pemantauan dosis real-time untuk fasilitas produksi F-18 berbasis siklotron yang telah dirancang mampu menekan paparan radiasi terhadap personel dan lingkungan sekitar yang mengacu pada standar IAEA dan peraturan nasional seperti PERKA BAPETEN No. 6 Tahun 2019 dan No. 1 Tahun 2010, sehingga menjamin kepatuhan regulatif terhadap perlindungan menyeluruh bagi pekerja, masyarakat, ataupun lingkungan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak Dr. Deni Swantomo, M.Eng. Selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan motivasi yang telah diberikan selama proses penyusunan makalah ini. Materi dan diskusi yang disampaikan selama perkuliahan sangat membantu penulis dalam memahami aspek regulasi dan hukum yang relevan dalam perancangan fasilitas produksi radioisotop. Segala ilmu dan pemikiran yang diberikan menjadi fondasi penting dalam penyusunan karya ilmiah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Diah, F. I., Kudus, I. A., & Permana, F. S. (2022). Desain Konseptual Internet Accelerator Laboratory (Ial) Untuk Siklotron Decy-13. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 11(1), 8-15.
- [2] Rasito, I., Permana, S., Ramdhani, M. A., & Yusnita. (2016). *Rancang Bangun Sistem Kendali dan Pemantauan Produksi Radioisotop Fluorin-18 pada Miniatur Siklotron*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Akselerator dan Aplikasinya (SENTAK).
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2010). *Cyclotron Produced Radionuclides: Principles And Practice*. Technical Reports Series No. 465.
- [4] Charles, M., Et Al. (2020). "Optimization Of Waste Segregation In Cyclotron Decommissioning." *Applied Radiation And Isotopes*, 157, 109024.
- [5] Park, J. H. (2020). *Radioisotope production and development with a 30 MeV cyclotron*. Korea Atomic Energy Research Institute.
- [6] ICRP Publication 103 (2007). *The 2007 Recommendations Of The International Commission On Radiological Protection*.
- [7] International Atomic Energy Agency. (2008). *Particle accelerators for medical diagnostics and therapy*. Vienna: IAEA
- [8] Kraft, G. (2000). *Tumor therapy with heavy charged particles*. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 45(S1), S473-S544.
- [9] International Atomic Energy Agency. (2012). *Cyclotron produced radionuclides: Guidance on facility design and production of fluorodeoxyglucose (FDG)* (Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 3). Vienna: IAEA.
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2010). *Cyclotron Produced Radionuclides: Principles And Practice*. Technical Reports Series No. 465.
- [11] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2010). *Radiation Safety Of Cyclotron Facilities*. Safety Standards Series No. Ssg-8.
- [12] International Atomic Energy Agency. (2008). *Radiation protection in the design of radiopharmaceutical production facilities* (Safety Reports Series No. 63). Vienna: IAEA.



- [13] International Atomic Energy Agency. (2006). *Radiation shielding in radiotherapy, nuclear medicine and diagnostic radiology* (IAEA-TECDOC-1471). Vienna: IAEA.
- [14] IAEA. (2004). *Radiation Protection And Safety Of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Safety Guide No. Rs-G-1.7. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [15] European Nuclear Society. (2024). *Hot cell*. In *Encyclopedia of nuclear technology*.
- [16] International Atomic Energy Agency. (2008). *Operational guidance on hospital radiopharmacy: a safe and effective approach* (STI/PUB/1342). Vienna: IAEA.
- [17] Akit, A. A. (2020). *Good radiopharmacy practice: design and standards for the hot laboratory*. *Nuclear Medicine Seminars*, 6(3), 284-287.
- [18] MDPI. (2023). *Design and construction of a radiochemistry laboratory and cGMP-compliant radiopharmacy facility*. *Pharmaceuticals*, 17(6), 680.
- [19] International Atomic Energy Agency. (2008). *Operational guidance on hospital radiopharmacy: A safe and effective approach* (STI/PUB/1342). Vienna: IAEA.
- [20] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). *Radiation Protection And Safety Of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. GSR Part 3.
- [21] International Atomic Energy Agency. (2006). *Quality assurance for radioactivity measurements in nuclear medicine* (Technical Report Series No. 454). Vienna: IAEA.
- [22] Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2020). *Peraturan BAPETEN Nomor 6 Tahun 2020 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Tenaga Nuklir*. Jakarta: BAPETEN.
- [23] Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2010). *Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 1 Tahun 2010 tentang Keamanan Fasilitas dan Bahan Nuklir*. Jakarta: BAPETEN.
- [24] Ranna, P., & Jin, O. F. (2024). *Beton Densitas Tinggi Sebagai Pelindung Radiasi - Systematic Literature Review*. *Jurnal Infrastruktur*, 10(2), 95-104.
- [25] MarShield. (2024). *Shielding options: Lead vs. Tungsten*. MarShield Custom Radiation Shielding Products.
- [26] Rasito, T., Bunawas, Taufik, Sunardi, & Suryanto, H. (2016). *Desain perisai radiasi untuk siklotron DECY-13 menggunakan metode Monte Carlo*. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, 231-240. ISSN 0216-3128.
- [27] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). *Radiation Protection And Safety Of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA.
- [28] Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2019). *Peraturan BAPETEN Nomor 6 Tahun 2019 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi*. Jakarta: BAPETEN.
- [29] Jumpeno, E., Tursinah, R., Kartubi, N., & Taufik, I. (2020). *Optimization Of Radiation Shielding Design For 13 Mev Cyclotron Using K-500 Concrete, Paraffin And Lead*. *Malaysian Journal Of Fundamental And Applied Sciences*, 16(6), 654-657.
- [30] Johnson, T., Et Al. (2019). "Real-Time Radiation Monitoring During Cyclotron Decommissioning: Enhancing Accuracy In Contamination Assessment." *Health Physics*, 117(3), 289-296.
- [31] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Management Of Low Level Radioactive Waste*. IAEA General Safety Guide No. GSG-1. Vienna: IAEA.
- [32] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Decommissioning Of Particle Accelerators*. IAEA TECDOC-1796. Vienna: IAEA.
- [33] Islamiaty, R. R., & Halimah, E. (2018). *Tinjauan Pustaka Mengenai Karakteristik Radioisotop Yang Digunakan Pada Pembuatan Radiofarmaka*. *Farmaka*, 16(1), 222-230.
- [34] Pellett, P., Et Al. (2017). "Effectiveness Of Specialized Coatings In Minimizing Residual Contamination In Nuclear
- [35] Sunderland, J. J., Erdahl, C. E., Bender, B. R., Sensoy, L., & Watkins, G. L. (2012). *Considerations, Measurements And Logistics Associated With Low-Energy Cyclotron Decommissioning*. *Aip Conference Proceedings*, 1509, 16-20.



- [36] Silakhuddin, & Santosa, S. (2012). Conceptual Design Study Of 13 Mev Proton Cyclotron. *Atom Indonesia*, 38(1), 7-14.
- [37] Silakhuddin. (2016). Penentuan Hasil Produk Radioisotop Fluor-18 Pada Fasilitas Siklotron Decy-13. *Jurnal Penelitian Saintek*, 21(1), 1-8.