

PEMANFAATAN SIKLOTRON

Heranudin, M.Eng., Ph.D

**Pelatihan Petugas Keahlian Pada Fasilitas Produksi Radioisotop dan Radiofarmaka
dari Siklotron untuk Area Produksi dan Area Sarana Penunjang Kritis
bagi Pegawai PT Global Onkolab Farma
30 Juni – 11 Juli 2025**

Direktorat Pengembangan Kompetensi BRIN

Acknowledge: Tim Siklotron CS-30 BRIN; IAEA Technical Documents

BIODATA

Foto Pengajar



- Nama : Dr. Heranudin
- Email: heranudin@brin.go.id
- Latar Belakang Pendidikan
 - Doktor (2022): Medical Radiation Physics, University of Wollongong
 - Master (2014): Electronic Engineering, University of Adelaide
 - Sarjana (2008): Electronic Engineering, Universitas Indonesia
- Pengalaman: BATAN/BRIN, Bidang Siklotron dan Instrumentasi Nuklir
- Output & Kontribusi Terpilih (4 Tahun Terakhir)
 - **Paten (2024):** Metode Pengukuran Aktivitas Radionuklida Single-Time Process
 - **Publikasi 2024:** "Development of a New $4\pi\beta$ – $4\pi\gamma$ Detection System for Absolute Measurement of Radionuclide Activity" (*Pure and Applied Geophysics*); "Characterization of a Germanium Detector by Means of Experimental Measurements and GEANT4 Monte Carlo Simulations" (*Journal of Physics Conference Series*)
 - **Publikasi 2023:** "A State Machine Application on the Target Transfer Control System of the CS-30 Cyclotron" (*ICONSTA - AIP*)
 - **Publikasi 2021:** "Characterisation of a well-type NaI(Tl) detector by means of a Monte Carlo simulation for radionuclide metrology application" (*Applied Radiation and Isotopes*)

LATAR BELAKANG

- Kebutuhan teknologi canggih terus meningkat di bidang medis, industri, dan riset.
- Siklotron adalah akselerator partikel yang mempercepat partikel bermuatan hingga energi tinggi.
- Awalnya dikembangkan untuk riset fisika nuklir, kini digunakan secara luas di berbagai sektor.
- Di bidang medis, siklotron sangat penting dalam produksi radionuklida untuk pencitraan seperti PET scan.
- Pemahaman dan pemanfaatan siklotron sangat penting untuk mendukung kemajuan teknologi dan kesehatan nasional.

MANFAAT

- Mengetahui berbagai aplikasi siklotron di berbagai bidang khususnya medis.
- Mengenali pentingnya siklotron dalam produksi radionuklida medis (misalnya: untuk PET scan).
- Mampu menjelaskan kontribusi siklotron terhadap pengembangan teknologi kesehatan.
- Mendapatkan wawasan tentang potensi pengembangan dan peluang riset berbasis akselerator partikel di Indonesia.

TUJUAN PEMBELAJARAN

-  **Kompetensi Dasar:**
 - Menjelaskan berbagai pemanfaatan siklotron, khususnya di bidang medis dan industri.
 - Menganalisis dampak dan potensi siklotron dalam pengembangan teknologi nuklir.
-  **Indikator Keberhasilan:**
 - Peserta mampu menyebutkan minimal tiga aplikasi medis dari siklotron.
 - Peserta dapat menjelaskan keuntungan dan tantangan penggunaan siklotron dalam bidang medis.
 - Peserta menunjukkan pemahaman melalui tanya jawab atau diskusi terkait potensi pengembangan siklotron di Indonesia.

POKOK BAHASAN

- Apa Itu Siklotron?
- Radionuklida Berbasis Siklotron
- Aplikasi Siklotron
- Tantangan Pemanfaatan Siklotron

1

Apa Itu Siklotron?

Apa Itu Siklotron?

- A cyclotron is a **compact electromagnetic device** capable of accelerating charged particles to high energies.
- There are many different types of cyclotrons:
 - A positive ion cyclotron:
 - Proton: 40 MeV, 100 μ A
 - Deuteron: 20 MeV, 230 μ A
 - Alpha: 40 MeV, 80 μ A



Apa Itu Siklotron?

- A negative ion cyclotron:
 - Proton: 30 MeV, 350 μ A
 - Deuteron: 15 MeV, 100 μ A



Apa Itu Siklotron?

- A self-shielded cyclotron:
 - Proton: 11 MeV, 80 μ A



Apa Itu Siklotron?

Characteristics of cyclotrons

- Particle type:
 - Light or heavy **ions** are accelerated
 - Either **positive** or **negative** ions are used
 - Most common are protons and deuterons
- Energy of the particle beam:
 - High energies are achieved
 - Most common are energies between 10 and 30 MeV
 - Cyclotrons with a maximal beam energy of several 100 MeV are available for research purposes and radiotherapy

Apa Itu Siklotron?

Characteristics of cyclotrons (cont)

- Beam current:
 - A beam of charged particles represents an **electric current**
 - Maximal beam currents of a few 10 μA up to over 1 mA are commercially available
- Power output:
 - A combination of particle energy and beam current
 - Typically between 1 kW and 10 kW

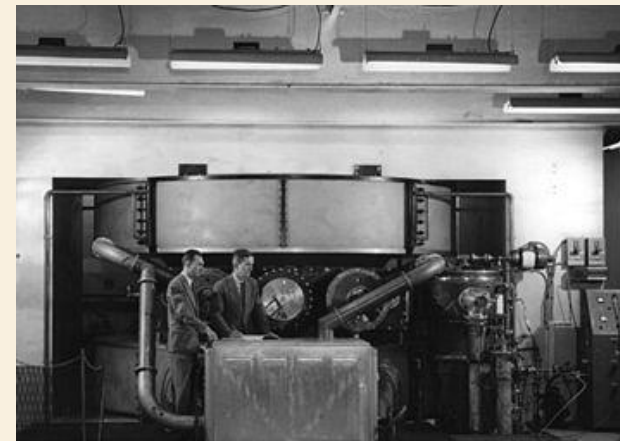
Apa Itu Siklotron?

➔ First Generation:

- It was not possible to distinguish between commercial cyclotrons and equipment used in research.

The Cyclotron Corporation (TCC) and Scanditronix

- ➔ Accelerate protons
- ➔ Internal ion source
- ➔ Local production



Apa Itu Siklotron?



Second Generation:

- In the 70s, the construction of a H⁻ accelerator was proposed. The extraction was very simple, leading to a broad range of possible energies for the beam.

CP42 and MC32NI (Scanditronix)

Apa Itu Siklotron?



Third Generation:

- Developed based on market expectations and improvements of existing H⁻ cyclotrons.



2

Radionuklida Berbasis Siklotron

Radionuklida Berbasis Siklotron

- Many radionuclides are produced in reactors as fission products or through activation, e.g.

^{99}Mo

- Not all radionuclides can be produced in reactors, e.g. ^{201}Tl , ^{18}F , ...

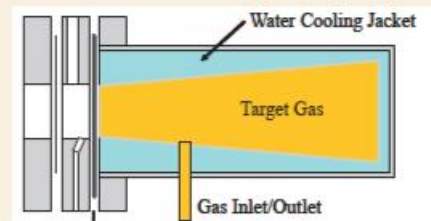
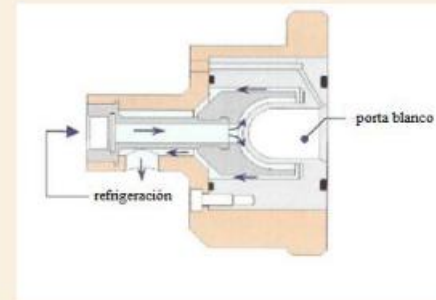
- These can only be produced through threshold reactions with charged particles

Radio nuclide	Reaction	Q - value
^{15}O	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$	1 MeV
^{18}F	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	3 MeV
^{201}Tl	$^{203}\text{Tl}(\text{p},3\text{n})^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	18 MeV
^{111}In	$^{112}\text{Cd}(\text{p},2\text{n})^{111}\text{In}$	11 MeV
^{67}Ga	$^{68}\text{Zn}(\text{p},2\text{n})^{67}\text{Ga}$	12 MeV

- Hence there is a need for high energy charged particles

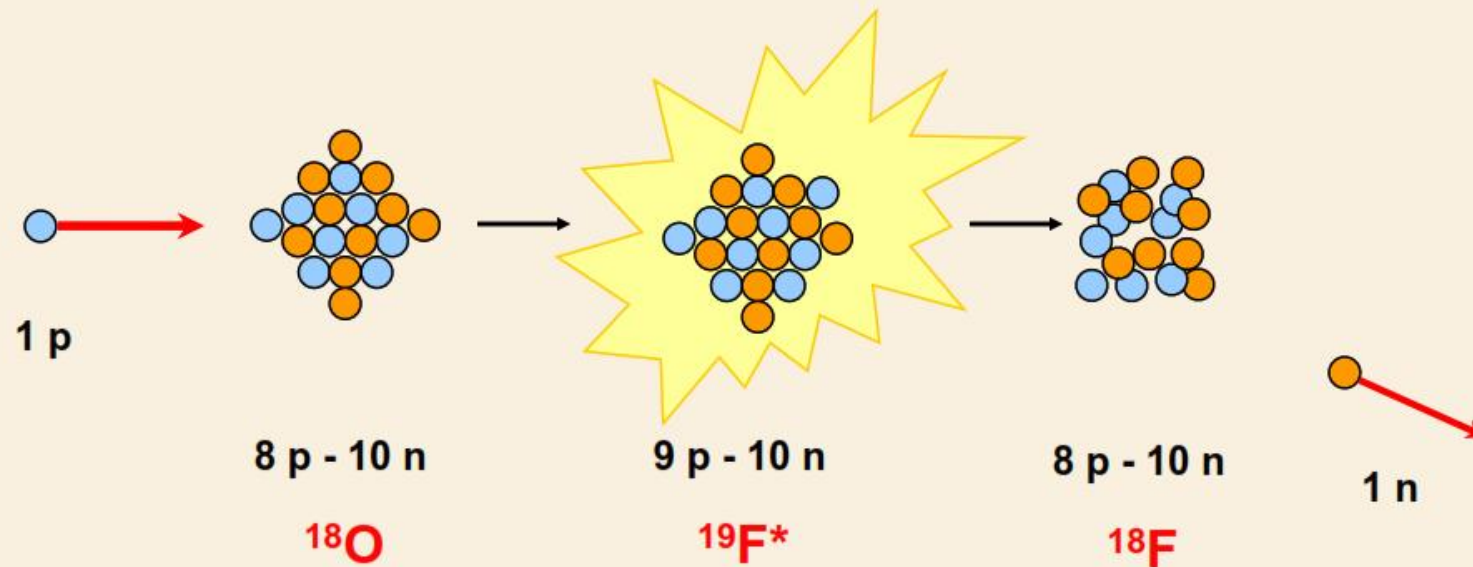
Radionuklida Berbasis Siklotron

➔ *Targets*

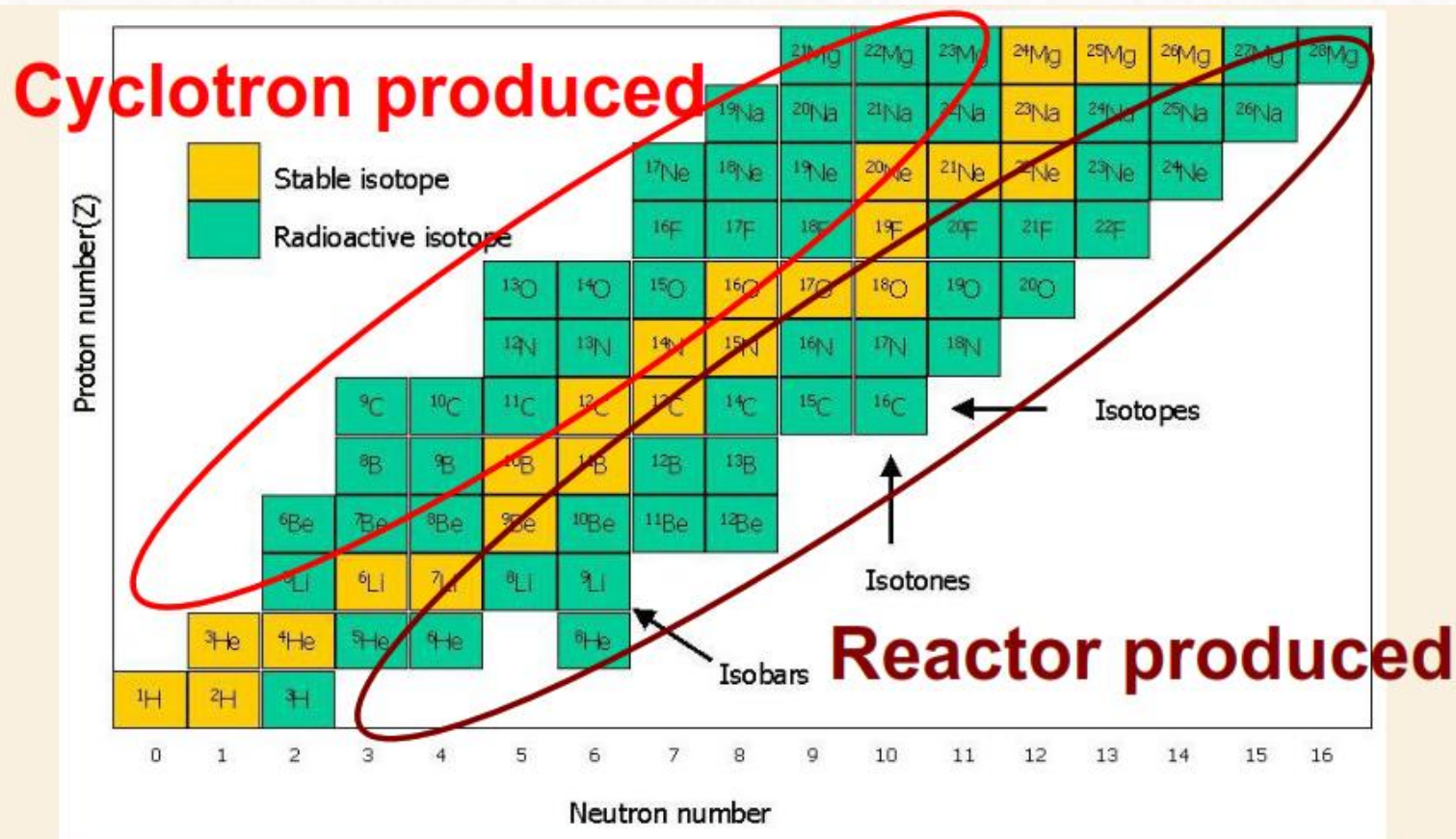


Radionuklida Berbasis Siklotron

Reaction mechanism



Radionuklida Berbasis Siklotron



Radionuklida Berbasis Siklotron

- The use of radionuclides in the physical and biological sciences can be divided into three categories:



TECHNICAL REPORTS SERIES No. 465

Radionuklida Berbasis Siklotron

- **Some typical radionuclides used in imaging**

Radionuclide	Half life	Reaction	Use
^{99m}Tc	6 h	$^{100}\text{Mo}(p, 2n)$ $^{235}\text{U}(n, f)$	SPECT
^{123}I	13.1 h	$^{124}\text{Xe}(p, 2n)$ $^{124}\text{Xe}(p, pn)$ $^{124}\text{Xe}(p, 2pn)$ $^{123}\text{Te}(p, n)$ $^{124}\text{Te}(p, 2n)$	SPECT

Radionuklida Berbasis Siklotron

Radionuclide	Half life	Reaction	Use
^{201}Tl	73.1 h	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)$	SPECT
^{67}Ga	3.2 d	$^{68}\text{Zn}(p, 2n)$	SPECT
^{11}C	20.3 min	$^{14}\text{N}(p, \alpha)$	PET
^{18}F	110 min	$^{18}\text{O}(p, n)$ $^{\text{nat}}\text{Ne}(d, \alpha)$	PET
^{13}N	10 min	$^{16}\text{O}(p, \alpha)$ $^{13}\text{C}(p, n)$	PET
^{15}O	2 min	$^{15}\text{N}(p, n)$ $^{14}\text{N}(d, 2n)$ $^{16}\text{O}(p, pn)$	PET

Radionuklida Berbasis Siklotron

Table 1. Shows Information on PET-FDG Diagnostic Accuracy for Specific Cancers [12] (refer to: The Journal of Nuclear Medicine Supplement, Volume 42, Number 5, May 2001)

Type of Cancer	Conventional Imaging (%)	PET (%)
Breast	67	89
Colorectal	80	94
Gastro-Oesophageal	68	83
Head-and-Neck	65	87
Liver	81	93
Lung	68	82
Lymphoma	64	88
Melanoma	80	91
Pancreatic	65	81
Testicular	68	92
Uterine/Cervical	43	87

3

Aplikasi Siklotron

Aplikasi Siklotron

Uses of cyclotrons

- Radionuclide production
 - For use in medicine, research and industry
 - High energy charged particles introduce changes in the nucleus of the atoms being irradiated
 - Typically threshold reactions, hence minimal energy of particles necessary



Aplikasi Siklotron

Radioisotop	Waktu paruh	Manfaat
Cobalt-57	271 Hari	Diagnostik (SPECT)
Galium-67	78 Jam	Diagnostik (SPECT)
Indium-111	2,8 Hari	Diagnostik (SPECT) dan terapi (auger electron emitter)
Iodine-123	13,2 jam	Diagnostik (SPECT) dan terapi (auger electron emitter)
Thalium-201	73,1 jam	Diagnostik (SPECT)
Carbon-11	20,4	Diagnostik (PET)
Flourine-18	110 menit	Diagnostik (PET)
Nitrogen-13	10 menit	Diagnostik (PET)
Oxygen-15	122 detik	Diagnostik (PET)
Galium-68	68 menit	Diagnostik (PET)
Rubidium-82	78 detik	Diagnostik (PET)
Astatine-211	7,2 jam	Terapi (alpha emitters)
Actinium-225	10 hari	Terapi (alpha emitters)
Yttrium-90	2,7 Hari	Terapi (beta emitters)
Iodine-124	4,2 hari	Terapi (beta emitters)
Platinum-193m	4,3 hari	Terapi (auger electron emitter)

Aplikasi Siklotron

- Radionuclide production
 - Reactions with different particles → need to accelerate different particles
 - Different reaction thresholds → need to accelerate to different energies
 - Multi-particle, multi-energy cyclotrons: very flexible, but complex machines, often positive ion cyclotrons
 - Dedicated accelerators: usually 2 types of particles (p and d) and 1 fixed energy for each particle, typical for negative ion cyclotrons

Aplikasi Siklotron

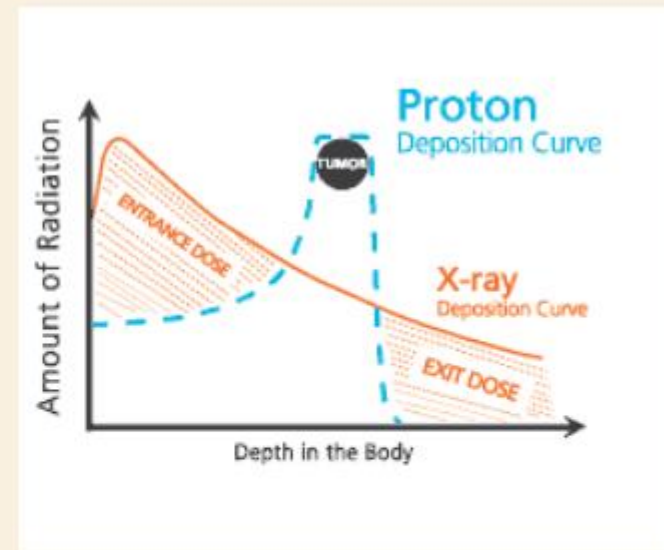
- Simulation of radiation damage
 - Materials exposed to intense beams of α -particles and neutrons
 - α -particles: implantation of He gas
 - Neutrons: displacement of atoms in crystal lattice

Aplikasi Siklotron

- Fast neutron activation analysis (FNAA)
 - Fast secondary neutrons used to activate samples
 - Determination of activation products reveals information on atomic composition of samples
 - Need for a well-characterised multi-energy neutron source
- Proton induced X-ray Emission (PIXE)
 - Excitation of K/L-electrons by protons followed by emission of characteristic X-ray for determination of atomic composition
 - Need for low energy proton beams of low intensity (1nA)

Aplikasi Siklotron

- Proton therapy
 - Delivering high doses to malignant tissue using proton beams instead of electron or photon beams
 - Bragg peak: tissue sparing effect is much larger and sharp dose gradients are possible
 - Patient and tumour positioning are crucial



4

Tantangan Pemanfaatan Siklotron

Tantangan Pemanfaatan Siklotron

- **Biaya Tinggi:** Instalasi, dan operasional siklotron sangat mahal.
- **Kompleksitas:** Membutuhkan tenaga ahli (fisikawan medis, radiokimiawan, operator) yang sangat terlatih.
- **Regulasi Ketat:** Terkait keamanan radiasi dan lisensi.
- **Logistik Radiofarmaka:** Jaminan pasokan, distribusi, dan manajemen limbah radioaktif.

LATIHAN SOAL

Apa definisi paling tepat dari siklotron dalam konteks pemanfaatan medis?

- A. Perangkat untuk melakukan operasi bedah mikro pada pasien.
- B. Mesin yang mengubah energi angin menjadi listrik di rumah sakit.
- C. Alat untuk menghasilkan sinar-X langsung untuk pencitraan tubuh.
- D. Akselerator partikel melingkar yang mempercepat partikel bermuatan untuk memproduksi radioisotop.

LATIHAN SOAL

Radioisotop apa yang paling umum diproduksi oleh siklotron untuk PET Scan, khususnya FDG-PET?

- A. Fluor-18 (^{18}F) karena memancarkan positron dan memiliki waktu paruh pendek.
- B. Karbon-14 (^{14}C) karena waktu paruhnya sangat panjang.
- C. Uranium-235 (^{235}U) sebagai sumber energi utama.
- D. Kobalt-60 (^{60}Co) untuk sterilisasi peralatan medis.

LATIHAN SOAL

Apa keunggulan utama terapi partikel (misalnya terapi proton) yang menggunakan siklotron untuk pengobatan kanker?

- A. Meningkatkan sistem kekebalan tubuh pasien.
- B. Penyembuhan luka terbuka dan patah tulang.
- C. Menghancurkan sel kanker dengan presisi tinggi, meminimalkan kerusakan jaringan sehat.
- D. Menghilangkan bakteri dan virus dari darah.

LATIHAN SOAL

Salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan siklotron di bidang medis adalah...

- A. Tidak menghasilkan limbah radioaktif sama sekali.
- B. Biaya akuisisi dan operasional yang tinggi, serta kompleksitas teknis.
- C. Sangat murah dan mudah dioperasikan oleh siapa saja.
- D. Membutuhkan ruang yang kecil dan sedikit perawatan.

LATIHAN SOAL

Dalam konteks medis, apa yang dimaksud dengan konsep "Teranostik"?

- A. Metode untuk mempercepat penuaan sel tubuh.
- B. Proses pembuatan obat-obatan generik secara massal.
- C. Konsep di mana diagnosa dan terapi dilakukan dengan alat yang berbeda.
- D. Strategi gabungan diagnostik dan terapi menggunakan satu radioisotop atau pasangan radioisotop.

LATIHAN SOAL

Apa peran krusial siklotron dalam penyediaan radioisotop untuk aplikasi medis, terutama yang berwaktu paruh sangat pendek?

- A. Hanya digunakan untuk penelitian fisika dasar, bukan produksi medis.
- B. Mampu memproduksi radioisotop berwaktu paruh sangat pendek yang tidak dapat diimpor.
- C. Tidak efisien dalam memproduksi radioisotop, butuh sumber lain.
- D. Hanya bisa memproduksi radioisotop dengan waktu paruh sangat panjang.

RANGKUMAN

- Siklotron adalah akselerator partikel yang vital dalam produksi radioisotop medis, kunci utama diagnostik dan terapi modern.
- Dalam diagnostik, siklotron memungkinkan PET Scan (Positron Emission Tomography) beroperasi dengan memanfaatkan radioisotop berumur pendek seperti Fluor-18.
- Untuk terapi, siklotron berperan dalam memproduksi radioisotop terapeutik dan juga dapat dimanfaatkan sebagai proton terapi yang sangat presisi, meminimalkan kerusakan jaringan sehat.
- Meskipun menghadapi tantangan seperti biaya tinggi dan kompleksitas, masa depan siklotron medis menjanjikan dengan pengembangan teknologi yang lebih kompak dan potensi teranostik yang inovatif, membuka inovasi baru dalam pengobatan.

Terima Kasih

Atas Perhatian Anda



B.J. Habibie Building
Jl. M.H. Thamrin 8, Jakarta 10340, Indonesia



www.brin.go.id



Brin Indonesia



@brin_indonesia



@brin.indonesia



Bridging Sciences
Empowering Talents

@dpk brin