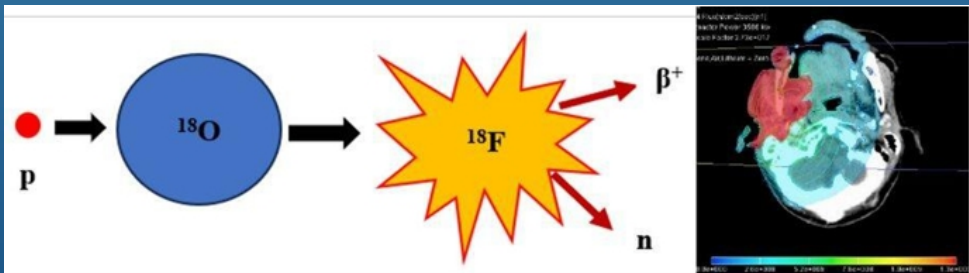


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

PROSPEKTIF TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON MENUJU VISI INDONESIA EMAS 2045

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
KEPAKARAN TEKNOLOGI PRODUKSI RADIOISOTOP



OLEH:

IMAM KAMBALI

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

ISSN 3090-8485

**PROSPEKTIF TEKNOLOGI PRODUKSI
RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON
MENUJU VISI INDONESIA EMAS 2045**

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



ISSN 3090-8485

**PROSPEKTIF TEKNOLOGI PRODUKSI
RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON
MENUJU VISI INDONESIA EMAS 2045**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU FISIKA
BIDANG FISIKA NUKLIR
KEPAKARAN TEKNOLOGI PRODUKSI RADIOISOTOP**

OLEH:
IMAM KAMBALI

Penerbit BRIN

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Prospektif Teknologi Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron Menuju Visi Indonesia Emas 2045/Imam Kambali–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

vii + 91 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Fisika Nuklir
3. Medis

2. Radionuklida
4. Siklotron

539.7

Copy editor : S. Imam Setyawan
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : S. Imam Setyawan
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
✕ @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. PERKEMBANGAN RISET TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON	15
A. Perkembangan Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Dunia Internasional.....	15
B. Perkembangan Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Indonesia	17
C. Perspektif Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Masa Depan.....	20
III. PARAMETER FISIK, JENIS DAN METODE PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON	23
A. Siklotron Sebagai Pemercepat Partikel Bermuatan.....	23
B. Parameter Fisik Teknologi Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron	25
C. Radionuklida PET dan SPECT.....	35
D. Radionuklida Terapi dan Teranostik	36
E. Metode Alternatif dalam Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron	38
IV. KONTRIBUSI ILMIAH DALAM RISET TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON	41
V. ANALISIS <i>STRENGTHS WEAKNESSES OPPORTUNITIES</i> <i>DAN THREATS (SWOT)</i>	45
A. <i>Strengths</i> (Kekuatan)	45

B. <i>Weaknesses</i> (Kelemahan)	47
C. <i>Opportunities</i> (Peluang)	47
D. <i>Threats</i> (Ancaman)	49
E. Analisis Rantai Pasokan Radionuklida Medis Berbasis Siklotron	51
VI. KESIMPULAN	53
VII. PENUTUP	55
UCAPAN TERIMA KASIH	57
DAFTAR PUSTAKA	59
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH	69
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA	78
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Perkembangan Riset Teknologi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron di Indonesia	17
Gambar 2	Perkembangan riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di dunia internasional.....	19
Gambar 3	Ilustrasi sederhana sistem pemercepatan partikel bermuatan di dalam siklotron.....	24
Gambar 4	Tampang lintang reaksi nuklir untuk produksi beberapa radionuklida medis SPECT (Kambali, 2019)	28
Gambar 5	Ilustrasi lintasan atom radioaktif Co-56 dan Ag-110m yang jatuh ke dalam larutan F-18 melalui mekanisme atom rekoil dan sputter (Kambali <i>et al.</i> , 2019).....	32
Gambar 6	Spektrum sinar gamma impuritas radioaktif yang terdeteksi satu bulan setelah iradiasi target air diperkaya dengan proton 18 MeV. Keterangan: (1) sinar-X, (2) Cd-109, (3,4) Co-57, (5) Ni-57, (6) Co-58, (7) Co-56 dan (8) Ni-57 (Kambali <i>et al.</i> , 2020).....	33
Gambar 7	Spektrum radioisotop Cu-64 hasil iradiasi target primer Ti dan target sekunder Zn-64 (Kambali <i>et al.</i> , 2024).....	40
Gambar 8	Tampilan utama perangkat lunak <i>CalcuYield</i>	43

BIODATA RINGKAS



Imam Kambali lahir di Mojokerto, Jawa Timur, tanggal 5 Mei 1980, adalah anak ke-8 dari 9 saudara Bapak Muntari (Almarhum) dan Ibu Amah (Almarhumah).

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 tanggal 9 Januari 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama di BRIN.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional 143/I/HK/2025 tanggal 10 Juni 2025 yang bersangkutan melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Sumbertebu II, tahun 1992, Sekolah Menengah Pertama Negeri I Bangsal, tahun 1995, dan Sekolah Menengah Umum Negeri I Mojosari, tahun 1998. Memperoleh gelar Sarjana Teknik Nuklir dari Universitas Gadjah Mada di Yogyakarta tahun 2002, gelar Magister Fisika dari The University of Newcastle tahun 2008, dan gelar Doktor bidang Fisika dari University College Dublin, National University of Ireland tahun 2014.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: *Joint ICTP/IAEA Workshop on Advance Computer Simulation for Ion Beam Analysis*, di ICTP, Italia (2009), *Joint ICTP/IAEA Advanced school on X-ray and gamma ray spectrometry*, di ICTP, Italia (2009), *Training*

program on Cyclotron Operation, Maintenance, and Application for Medical Radionuclide Production, di King Faisal Specialist Hospital and Research Centre, Saudi Arabia (2016), *Joint ICTP-IAEA Workshop on the Evaluation of Nuclear Reaction Data for Applications*, di ICTP, Italia (2017), *Ion Beam Application Training Sessions: Accelerator Principles, Cyclotron Overview, Vacuum System Theory, RF Theory, Applications, GMP, Synthesis Module*, di IBA, Belgia (2017), *Practical Training on Cyclotron Technology and Application to Support Nuclear Medicine in Indonesia*, di SKKU, Korea Selatan (2019).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Bidang Teknologi Radioisotop (tahun 2018 – 2019), dan Kepala Bidang Fisika Partikel (tahun 2019 – 2020).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Asisten Peneliti Ahli Pertama III/a tahun 2005, Peneliti Ahli Muda golongan III/c tahun 2009, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2017, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/d bidang Fisika Nuklir tahun 2023.

Menghasilkan 61 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 54 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 7 dalam Bahasa Indonesia. Serta menghasilkan 3 paten.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti Muda pada Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka–BATAN. pembimbing Tugas Akhir (D-4) pada Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir (STTN), pembimbing skripsi (S-1) pada pada Universitas Gadjah Mada, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Jati, Universitas Diponegoro, pembimbing, pembimbing Disertasi (S3) pada Universitas Gadjah Mada, pembimbing Disertasi (S3)

pada Universiti Sains Malaysia, serta pembimbing Magister (S2) pada Universitas Gadjah Mada.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota The International Society for Optics and Photonics (SPIE) USA (2011-2013), anggota Institute of Physics UK and Ireland (2010-2013), anggota *Physical Society of Indonesia* (2018-2020), anggota aktif Himpenindo/Perhimpunan Periset Indonesia (2018-sekarang).

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X-Tahun dari Presiden RI (2015), dan penghargaan Satyalancana Karya Satya XX-Tahun dari Presiden RI (2023).

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 20 Agustus 2025 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“PROSPEKTIF TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA
MEDIS BERBASIS SIKLOTRON MENUJU VISI
INDONESIA EMAS 2045”**

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan data Globocan tahun 2022, jumlah penderita kanker di dunia meningkat drastis dengan perkiraan tambahan sekitar 20 juta kasus. Dari 20 juta kasus kanker tersebut, sekitar 9,7 juta di antaranya meninggal dunia (Bray *et al.*, 2023). Artinya beban kanker dunia menjadi sangat besar baik dari segi kesehatan masyarakat maupun ekonomi. Bahkan saat ini kanker menduduki peringkat pertama di dunia sebagai penyakit yang menyebabkan kematian (Sung *et al.*, 2021). Beban kesehatan masyarakat yang berat ini juga diikuti dengan beban ekonomi yang juga sangat berat, yaitu diperkirakan biaya penanganan kanker antara tahun 2020 dan 2050 sebesar 25,2 triliun USD (Chen *et al.*, 2023).

Di Indonesia, berdasarkan data Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) yang dilakukan oleh Kementerian Kesehatan (Kemenkes) tahun 2022 dan data Globocan 2022, terdapat 408.661 kasus kanker dan total kematian 242.099. Artinya tingkat kematian penderita kanker di Indonesia mencapai 59,24%. Prevalensi kanker di Indonesia pada tahun 2023 berdasarkan data Kementerian Kesehatan berada di angka 1,2 per 1000 penduduk di tahun 2013 menjadi 1,8 per 1000 penduduk. di tahun 2018. Apabila menilik provinsinya, maka DI Yogyakarta menjadi provinsi dengan prevalensi kanker tertinggi di Indonesia, mencapai 3,6 per 1.000 penduduk. DKI Jakarta berada di urutan kedua dengan 2,4 kasus per 1.000 penduduk. Di posisi ketiga adalah Sumatera Barat dengan 2 kejadian per 1.000 penduduk (Kemenkes RI, 2023).

Peningkatan jumlah kasus kanker dari 396.914 kasus pada tahun 2020 menjadi 408.661 kasus pada tahun 2022 dan tingginya angka kematian sebesar 59,2% akibat kanker tentu menjadi beban yang berat bagi kesehatan masyarakat maupun ekonomi Indonesia, sehingga masalah kanker ini harus dapat segera ditangani dengan baik oleh pemerintah. Salah satu metode nuklir yang telah diakui dan digunakan di dunia kedokteran nuklir untuk diagnosis dan terapi kanker adalah dengan menggunakan isotop yang memancarkan radiasi nuklir (disebut sebagai radionuklida atau radioisotop medis). Dengan kata lain bahwa radionuklida medis adalah isotop radioaktif yang digunakan dalam bidang kedokteran, terutama untuk diagnostik dan terapi. Radionuklida pemancar positron atau sinar gamma energi rendah dapat digunakan dalam diagnosis kanker melalui modalitas *Positron Emission Tomography* (PET) dan *Single Emission Computed Tomography* (SPECT). Untuk terapi kanker dapat digunakan radionuklida yang memancarkan radiasi beta maupun alfa. Beberapa radionuklida bahkan mempunyai fungsi ganda, yaitu dapat digunakan sebagai radionuklida terapi dan diagnosis atau yang biasa disebut dengan radionuklida teranostik (Kambali *et al.*, 2024).

Radionuklida medis dapat diproduksi dengan menggunakan reaktor nuklir maupun akselerator, khususnya siklotron. Neutron yang dihasilkan di dalam reaktor nuklir ditembakkan ke target tertentu melalui reaksi nuklir (n,γ) sehingga dihasilkan radioisotop medis. Diantara radioisotop medis yang dihasilkan dengan reaksi (n,γ) dalam reaktor nuklir dan yang paling banyak dimanfaatkan dalam kedokteran nuklir adalah $Mo-99$ yang selanjutnya meluruh menjadi radioisotop $Tc-99m$ yang digunakan dalam diagnosis berbagai penyakit dengan modalitas SPECT. Berdasarkan data reaktor riset Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), dari sejumlah 800 reaktor riset di

dunia, 74 di antaranya telah ditutup. Bahkan saat ini produksi radioisotop telah bergeser dari reaktor ke siklotron. Sekitar 95% radioisotop telah diproduksi dengan menggunakan siklotron (Kambali, 2019).

Salah satu kekurangan produksi radioisotop medis dengan reaktor nuklir adalah investasinya yang sangat mahal, sehingga dewasa ini teknologi produksi radionuklida medis bergeser ke siklotron karena investasinya yang jauh lebih murah dibandingkan dengan reaktor nuklir dan jenis radionuklida medis yang dihasilkan dari siklotron pun jauh lebih banyak dibandingkan dengan reaktor nuklir karena siklotron dapat mempercepat beberapa partikel seperti proton, deuteron, triton, He-3, He-4 dan lain-lain sehingga memperluas cakupan reaksi nuklir untuk produksi radionuklida. Bahkan siklotron juga dapat menghasilkan neutron sekunder dengan spektrum energi yang luas, mulai dari neutron lambat sampai dengan neutron cepat dari penembakan target primer tertentu sehingga memungkinkan untuk digunakan dalam produksi radioisotop medis berbasis neutron sekunder (Kambali *et al.*, 2024).

Saat ini, lebih dari 1.200 siklotron di seluruh dunia yang digunakan untuk produksi isotop, terutama isotop medis seperti F-18, C-11, Ga-68, Tc-99m (Kambali, 2019) dan lain-lain. Fluor-18 (FDG) merupakan isotop yang digunakan untuk PET, adalah isotop yang paling banyak diproduksi, dengan produksi global mencapai lebih dari 50 juta dosis per tahun. Beberapa negara dengan kapasitas produksi isotop terbesar adalah Amerika Serikat yang memiliki sekitar 250 siklotron untuk produksi isotop medis. Di Eropa, negara seperti Belgia dan Jerman memiliki fasilitas besar untuk produksi isotop, termasuk isotop terapi seperti Lutetium-177. Kanada telah dikenal luas sebagai produsen utama isotop untuk diagnostik,

termasuk Molybdenum-99. Di Asia, seperti Korea Selatan, Cina, dan Jepang memiliki jaringan produksi isotop yang terus berkembang. Dewasa ini, secara global terjadi peningkatan jumlah isotop untuk terapi kanker, seperti Lutetium-177 (Mayesni *et al.*, 2019), Yttrium-90 (Kambali & Wibowo, 2023) dan Actinium-225. Peningkatan permintaan global tersebut diproyeksikan tumbuh lebih dari 10% per tahun.

Di Indonesia, PT INUKI (Industri Nuklir Indonesia) merupakan salah satu produsen isotop. Meskipun sebagian besar isotop di Indonesia diproduksi menggunakan reaktor nuklir (reaktor G.A Siwabessy, Serpong), siklotron juga mulai digunakan di beberapa rumah sakit. Rata-rata produksi isotop FDG di siklotron Indonesia adalah sekitar 30-50 dosis per hari di masing-masing fasilitas. Dengan pertumbuhan kebutuhan medis, terutama untuk diagnosa kanker, permintaan isotop medis di Indonesia meningkat pesat. Diperkirakan pasar isotop medis tumbuh 5-10% per tahun, didorong oleh kebutuhan radiologi dan terapi kanker (Kambali, 2019).

Riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron dewasa ini sedang mengalami perkembangan yang sangat pesat mengingat kebutuhan berbagai jenis radionuklida yang dapat digunakan dalam diagnosis maupun terapi kanker dan penyakit lainnya. Di negara-negara maju, riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron seperti F-18, Cu-64, Tc-99m, Sc-47 dan lain sebagainya menjadi fokus riset kekinian. Sampai akhir tahun 2024, di Indonesia baru ada 3 siklotron yang melayani kedokteran nuklir, yaitu di RS Kanker Dharmas (Kambali *et al.*, 2016), RS MRCCC Siloam Hospital (Kambali *et al.*, 2020), RS Gading Pluit, yang semuanya berada di Jakarta. Hal ini menunjukkan belum adanya pemerataan pelayanan kedokteran nuklir di Indonesia sehingga dikhawatirkan

kasus kanker di luar wilayah Jabodetabek tidak dapat ditangani dengan baik. Mengingat umur paruh radionuklida medis relatif singkat dan Indonesia terdiri dari ribuan pulau, maka selayaknya Indonesia memiliki fasilitas siklotron dan kedokteran nuklir yang tersebar merata dan dapat melayani diagnosis dan terapi kanker dan penyakit degeneratif lainnya berbasis radioisotop dan radiofarmaka.

Ketiga Rumah Sakit yang memiliki fasilitas siklotron itupun sampai saat ini hanya mampu memproduksi radionuklida fluorin-18 (F-18), sehingga diagnosis kanker dan penyakit degeneratif lainnya menjadi sangat terbatas (Kambali *et al.*, 2016). Rendahnya riset dan inovasi dalam teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron menjadi salah satu sebab keterbatasan produksi radionuklida medis di Rumah Sakit.

Program Nasional Pembangunan Siklotron di Indonesia merupakan bagian dari upaya untuk mengembangkan teknologi nuklir secara mandiri, khususnya dalam memproduksi radioisotop dan radiofarmaka untuk kebutuhan medis, penelitian, dan industri. Program ini diprakarsai oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 2009, yang kemudian dilanjutkan setelah BATAN dilebur ke dalam BRIN. Sampai pada akhir tahun 2024, BRIN telah dan sedang membangun siklotron 13 MeV yang sudah pada tahap penyelesaian. Disamping itu, program pembangunan siklotron 30 MeV juga sedang dicanangkan dengan tujuan untuk meningkatkan kapasitas produksi radionuklida medis (Silakhuddin *et al.*, 2022).

Beberapa perusahaan swasta dan rumah sakit saat ini juga sedang dalam tahap konstruksi maupun perijinan pembangunan siklotron, di antaranya PT Interskala Medika Solusindo di Jawa Tengah, PT Biofarma di Jawa Barat, PT Global Oncolab di Jakarta dan Jawa Timur, Rumah Sakit Mandya Royal Puri

Hospital di Banten, dan RS Murni Sadar di Medan, Sumatera Utara yang akan menginstall siklotron GE PETrace 16,5 MeV dan arus proton 200 μ A. Di RSPAD Gatot Soebroto saat ini sedang dilakukan ijin konstruksi siklotron ACSI Tr-FLX 24 yang berkapasitas 30 MeV. Siklotron IBA Cyclone Kiube 100 yang sudah diinstal di RS Abdoel Wahab Sjahranie, Samarinda saat ini sedang mengajukan ijin operasi. Dengan banyaknya perusahaan swasta dan Rumah Sakit di Indonesia yang memiliki program pembangunan siklotron diharapkan pelayanan kodokteran nuklir Indonesia akan semakin maju (Kambali *et al.*, 2020).

Di Indonesia, untuk diagnosis kanker dengan teknologi nuklir dilakukan dengan menggunakan radionuklida F-18 dalam bentuk senyawa radiofarmaka $^{18}\text{Fluorodeoxyglucose}$ (^{18}FDG) yang diinjeksikan ke pasien untuk selanjutnya tubuh pasien dipindai dengan modalitas PET. Modalitas PET memanfaatkan partikel positron (β^+) yang akan teranihilasi (termusnahkan) ketika berinteraksi dengan elektron dan selanjutnya dari proses anihilasi (pemusnahan) tersebut dihasilkan dua sinar gamma dengan energi 0,511 MeV yang saling berlawanan arah. Radiasi gamma ini selanjutnya ditangkap oleh kamera gamma dan diproses oleh komputer untuk menghasilkan gambar organ tubuh pasien. Dari gambar tersebut dapat ditentukan ada atau tidaknya sel kanker dalam tubuh pasien. Di RS Kanker Dharmais, radionuklida F-18 diproduksi menggunakan siklotron 11 MeV (Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016b), sedangkan di MRCCC Siloam Hospital dan RS Gading pluit, radionuklida F-18 diproduksi masing-masing menggunakan siklotron 18 MeV (Kambali *et al.*, 2020) dan 9 MeV.

Selain modalitas PET, digunakan juga modalitas SPECT yang menggunakan radionuklida pemancar sinar gamma dengan energi yang relatif rendah antara 0,1 – 0,2 MeV (Zanzonico,

2017). Salah satu radionuklida yang digunakan untuk SPECT adalah Tc-99m yang dapat diproduksi menggunakan reaktor nuklir maupun siklotron. Saat ini, sediaan radioisotop Tc-99m 100% diimpor dari luar negeri karena Indonesia belum bisa memproduksinya dalam skala industri.

Kebutuhan PET/CT secara global semakin hari semakin meningkat (Kambali *et al.*, 2020). Di Amerika Serikat, meskipun jumlah PET/CT sudah mencapai lebih dari 2.500 unit yang tersebar di rumah sakit dan klinik dan telah melayani lebih dari dua juta pencitraan medis per tahun, namun program penambahan jumlah PET/CT masih terus digalakkan. Negara-negara Eropa seperti Jerman, Prancis, dan Inggris memiliki infrastruktur PET/CT yang mapan dan terus berupaya untuk mengupgrade teknologi terbaru. Eropa Timur juga terus meningkatkan fasilitas PET/CT melalui program kesehatan nasional. Di Asia, Cina adalah salah satu negara dengan pertumbuhan fasilitas PET/CT tercepat di samping Jepang dan Korea Selatan. India sedang mengembangkan lebih banyak fasilitas PET/CT melalui kerjasama antara pemerintah dan sektor swasta. Program PET/CT di Afrika sampai saat ini masih sangat terbatas, namun sedang meningkat, terutama melalui dukungan organisasi internasional seperti IAEA.

Di Indonesia, saat ini hanya ada sepuluh rumah sakit yang sudah memiliki fasilitas PET/CT, di antaranya RS Kanker Dharmas, RS Gading Pluit, RS MRCCC Siloam Hospital, dan lain-lain. Namun program pembangunan fasilitas PET/CT saat ini terus ditingkatkan. Kementerian Kesehatan sedang mempercepat pembangunan jejaring fasilitas PET/CT dan siklotron guna mendukung pelayanan penanganan kanker di tanah air. Jumlah fasilitas PET/CT yang baru dan akan terpasang di beberapa rumah sakit ditargetkan sebanyak 6 unit di tahun

2024, 9 unit di tahun 2025 dan 1 unit di tahun 2027 (Kambali *et al.*, 2020).

Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron melibatkan beberapa proses nuklir yang kompleks, membutuhkan peralatan canggih dan kompetensi yang khusus, terutama kompetensi terkait reaksi nuklir, interaksi partikel bermuatan dengan materi (Kambali *et al.*, 2014a), desain sistem target (Kambali *et al.*, 2014b), pemilihan bahan target, pemisahan dan pemurnian radionuklida. Mengingat pentingnya penggunaan radionuklida medis dalam diagnosis dan terapi, maka diperlukan penguasaan teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron sebagai ujung tombak dalam mendukung pelayanan kedokteran nuklir nasional.

Dalam orasi ini, akan disampaikan bahasan tentang perkembangan penelitian (*state of the art*) teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron, parameter fisik, jenis radionuklida medis, metode alternatif dalam produksi radionuklida medis berbasis siklotron, termasuk kontribusi ilmiah, peran, potensi dan tantangan teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di masa depan. Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron yang berkembang saat ini memberikan peluang besar dalam penguasaan aplikasi siklotron untuk menyelesaikan permasalahan nasional dan global dalam memerangi penyakit kanker (Jalilian, *et al.*, 2021).

II. PERKEMBANGAN RISET TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON

Riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di Indonesia pada mulanya sangat jauh tertinggal dengan negara-negara maju karena di Indonesia masih belum ada fasilitas dan sumber daya manusia (SDM) yang terlatih untuk melakukannya. Namun saat ini ketertinggalan tersebut sudah mulai dapat dikejar dengan adanya beberapa fasilitas siklotron dan SDM mumpuni.

A. Perkembangan Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Dunia Internasional

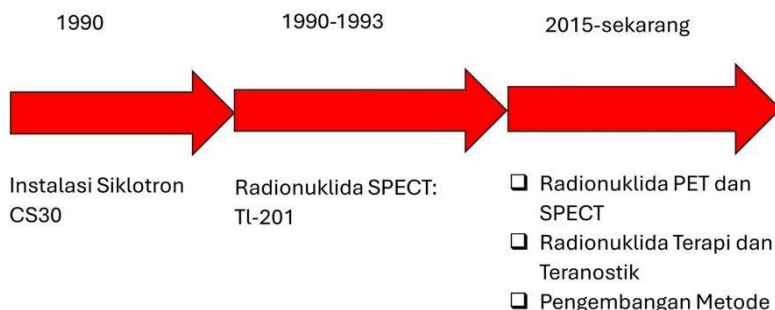
Dalam tataran global, setelah siklotron ditemukan oleh Ernest O. Lawrence pada tahun 1930, riset terkait potensi pemanfaatan siklotron untuk produksi radionuklida medis dimulai sejak tahun 1938 dengan penemuan radionuklida Fe-59 oleh John Livingood dan Glenn Seaborg (Schuh *et al.*, 2010). Pada masa perang dunia II dan pasca perang dunia II (1940an-1960an), siklotron lebih banyak digunakan untuk keperluan militer meskipun tetap ada kegiatan riset teknologi produksi radionuklida medis yang tujuan utamanya adalah untuk pelayanan kedokteran nuklir di rumah sakit militer di Amerika. Pada mulanya, eksperimen produksi radionuklida medis berbasis siklotron tersebut lebih difokuskan pada produksi radionuklida pemancar positron untuk pencitraan medis dengan modalitas PET, terutama setelah ditemukannya alat pencitraan berbasis PET pada tahun 1953 oleh Dr. Brownell

dan timnya di Rumah Sakit Massachussets, Boston (Jones & Townsend, 2017).

Dengan berkembangnya sistem target untuk produksi radionuklida medis berbasis siklotron dan proses radiokimia pada tahun 1980an – 1990an, riset produksi radionuklida medis berbasis siklotron semakin berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan *yield* radionuklida. Dewasa ini, selain pengembangan sistem target, desain target, dan standardisasi data nuklir, riset teknologi produksi radionuklida medis juga lebih berfokus pada berbagai macam jenis radionuklida PET, SPECT dan terapi, serta reaksi nuklir yang memungkinkan untuk mendapatkan *yield* radionuklida yang tinggi dan disaat yang sama meminimalkan radionuklida impuritas (pengotor) yang dihasilkan dari reaksi nuklir tersebut (Kambali, 2018). Untuk diketahui bahwa satu jenis radionuklida dapat diproduksi dengan beberapa reaksi nuklir yang berbeda, sehingga diperlukan pemilihan reaksi yang paling optimal dalam menghasilkan radionuklida yang diinginkan atau pengembangan metode baru berbasis siklotron (Kambali *et al.*, 2024).

Sejalan dengan perkembangan riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di Indonesia, saat ini dunia internasional juga sedang berlomba-lomba mencari metode alternatif atau metode baru dalam produksi radionuklida medis berbasis siklotron menggunakan neutron sekunder yang dihasilkan dari iradiasi target primer dengan berkas proton. Salah satu metode produksi radionuklida medis berbasis neutron sekunder adalah dengan cara memanfaatkan neutron yang dihasilkan dari iradiasi target air diperkaya untuk produksi radioisotop Cu-64 (Auditore *et al.*, 2017). Secara ringkas,

perkembangan riset teknologi radionuklida medis berbasis siklotron ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Perkembangan Riset Teknologi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron di Indonesia

B. Perkembangan Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Indonesia

Riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di Indonesia pertama kali dilakukan di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) setelah siklotron CS30 (*Cyclotron System 30*) diinstal di Pusat Radioisotop dan Radiofarmaka (PRR), BATAN, Serpong pada tahun 1990. Radionuklida yang pertama diproduksi oleh siklotron CS30 tersebut adalah radionuklida SPECT, yaitu TI-201 (Sunarhadijoso, dkk. 1993). Namun kelanjutan riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron terhenti setelah terjadi penurunan kinerja siklotron CS30 yang hanya mampu menghasilkan arus berkas proton sekitar 1 μA . Meskipun dengan arus yang kecil tersebut tidak bisa digunakan untuk produksi radionuklida medis, tetapi masih bisa digunakan untuk studi pengukuran laju degradasi bahan

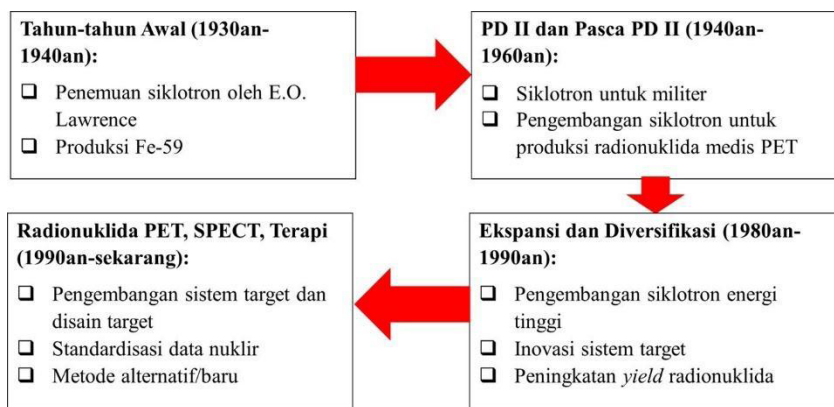
industri (Kambali & Suryanto, 2005), (Kambali & Suryanto, 2016).

Pada tahun 1998, Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka terbit perdana sebagai wadah para periset untuk memublikasikan makalahnya. Namun sayang, jurnal tersebut berhenti terbit setelah terbitan terakhir Volume 18 Tahun 2015 salah satunya karena periset lebih memilih untuk mempublikasikan karya ilmiahnya di jurnal internasional. Riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron sempat terhenti selama lebih dari 10 tahun sejak siklotron CS30 berhenti beroperasi. Namun demikian, sejak tahun 2015, meskipun siklotron di BATAN sudah tidak dapat berfungsi dengan baik, riset teknologi produksi radionuklida medis dilanjutkan lagi dengan menggunakan siklotron 11 MeV yang ada di RS Kanker Dharmais, Jakarta untuk produksi radionuklida PET, yaitu Fluor-18 (F-18). Disamping itu, riset awal teknologi produksi radionuklida Tc-99m berbasis siklotron juga telah dilakukan (Kambali, *et al.*, 2016). Riset tersebut untuk mengimplementasikan kerjasama antara BATAN dan RS Kanker Dharmais, Jakarta. Selain itu, kerjasama riset dengan RS Kanker Dharmais, dilakukan juga kerjasama riset produksi F-18 dengan siklotron 18 MeV yang ada di RS MRCCC Siloam Hospital, Jakarta.

Selain dengan eksperimen, riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron juga dilakukan melalui studi simulasi komputer maupun teoritis terutama untuk radionuklida PET selain F-18 seperti I-123 (Kambali & Suryanto, 2014), Ga-68 (Kambali & Wibowo, 2019), Ga-67 (Kambali, 2020), dan lain-lain. Radionuklida SPECT selain Tc-99m (Kambali *et al.*, 2020) seperti I-124 (Kambali & Suryanto, 2014) juga telah ditelaah secara teoritis. Sementara itu, riset teknologi produksi radionuklida terapi seperti Sm-153 (Kambali, 2018a),

Ir-192 (Rezki *et al.*, 2020), I-125 (Maiyesni *et al.*, 2023), At-211 (Kambali, 2018b), Sc-47 (Wibowo & Kambali, 2021), Re-186 (Kambali, 2021a), dan radionuklida teranostik seperti Lu-177 (Kambali, 2018c)(Maiyesni *et al.*, 2019), dan Cu-64 (Kambali, 2014a) dilakukan secara simulasi komputer.

Metode terbaru dalam riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron saat ini sedang dikembangkan untuk studi teoritis dan eksperimen produksi radionuklida Ni-57, Co-57 (Suryanto & Kambali, 2018) dan Cu-64 berbasis neutron sekunder yang dihasilkan oleh siklotron pada saat berkas proton ditembakkan ke target titanium (Kambali *et al.*, 2023; Kambali & Febrianto, 2021). Secara ringkas, perkembangan riset teknologi produksi radionuklida medis di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Perkembangan riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di dunia internasional

C. Perspektif Riset Teknologi Produksi Radionuklida Medis di Masa Depan

Riset teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron terus berevolusi hingga sekarang sehingga memberikan kesempatan yang luas untuk meningkatkan akurasi diagnostik berbagai penyakit degeneratif, memajukan intervensi terapeutik, dan berkontribusi terhadap keseluruhan kemajuan kedokteran nuklir. Di masa yang akan datang, beberapa potensi pengembangan riset ini di antaranya adalah: pertama, pengembangan metode baru. Metode baru teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron di masa yang akan datang akan terus berkembang, misalnya melalui eksplorasi reaksi nuklir yang selama ini belum banyak tersentuh seperti reaksi nuklir $(p,2n)$, (d,n) , $(d,2n)$, (α,n) , $(\alpha,2n)$, dan lain-lain untuk menghasilkan sumber neutron sekunder yang akan dimanfaatkan untuk produksi radionuklida medis (Kambali *et al.*, 2024).

Kedua, pencarian radionuklida baru. Beberapa radionuklida baru yang non-konvensional berpeluang untuk dimanfaatkan dalam diagnosis dan terapi, namun sampai saat ini radionuklida tersebut masih belum mendapatkan perhatian yang luas, misalnya radionuklida skandium ($Sc-43$ dan $Sc-44$) untuk diagnosis berbasis PET, maupun radionuklida terapi yang memancarkan elektron *Auger* seperti antimoni-119 ($Sb-119$) dan merkuri-197m ($Hg-197m$), dan masih banyak lagi radionuklida non-konvensional yang masih perlu diteliti lebih lanjut (Jalilian, *et al.*, 2021).

Ketiga, pengoperasian secara otomatis dan terkendali (Kambali *et al.*, 2016)). Saat ini, penggunaan sistem kontrol sudah banyak dipakai dalam teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron, mulai dari iradiasi dengan siklotron, sistem kontrol target, sistem transfer target, sistem pemisahan

dan pemurnian radionuklida. Namun demikian ada beberapa keterbatasan dalam sistem kontrol tersebut, di antaranya kapasitas produksi yang terbatas, ketidakstabilan produksi, biaya investasi awal yang tinggi, kontrol kualitas yang ketat dan masalah keselamatan radiasi, sehingga masih ada celah untuk mengeksplorasi lebih lanjut terkait sistem kontrol tersebut.

Keempat, pengurangan dampak lingkungan. Produksi radionuklida medis menghasilkan limbah baik nuklir maupun non nuklir. Limbah tersebut harus dikelola dengan hati-hati sesuai dengan peraturan dan standar keselamatan nuklir. Siklotron menghasilkan limbah radioaktif dengan volume kecil tetapi konsentrasi aktivitas tinggi, sehingga memerlukan pengelolaan yang presisi. Setiap jenis limbah harus dikarakterisasi untuk menentukan metode pengelolaan yang sesuai, terutama limbah dengan isotop radioaktif (Wibowa *et al.*, 2024). Limbah harus dikelola agar tidak mencemari lingkungan atau jatuh ke tangan yang tidak bertanggung jawab. Pengelolaan harus mematuhi standar internasional seperti *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dan peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten).

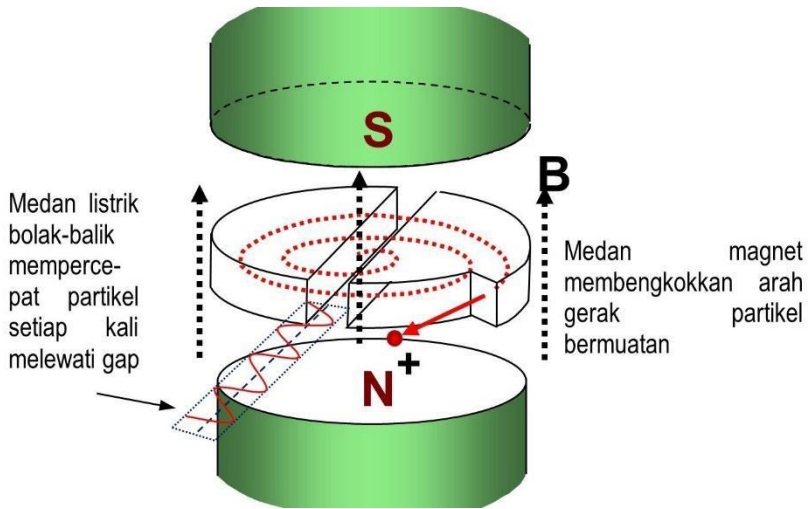
III. PARAMETER FISIK, JENIS DAN METODE PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON

Teknologi produksi radionuklida medis tidak terlepas dari mesin siklotron sebagai fasilitas utama. Selain itu, untuk keberhasilan dan optimalisasi produksi radionuklida medis diperlukan pengetahuan terkait parameter fisik, jenis radionuklida dan juga metode produksinya.

A. Siklotron Sebagai Pemercepat Partikel Bermuatan

Siklotron merupakan jenis akselerator siklis yang mampu mempercepat partikel bermuatan secara siklis at melingkar dalam medan magnet (Gambar 3) sehingga dihasilkan energi yang tinggi untuk tujuan tertentu. Siklotron pertama kali dibuat oleh Ernest O. Lawrence di University of California, Berkeley pada tahun 1932. Partikel yang paling banyak dipercepat dalam siklotron antara lain proton, deuteron, He-3, He-4 dan beberapa partikel lain untuk aplikasi di bidang industri maupun medis. Siklotron terdiri dari dua elektroda berbentuk setengah lingkaran yang diletakkan di dalam sebuah ruangan hampa udara. Partikel bermuatan diinjeksikan ke dalam siklotron dan dipercepat dengan menggunakan medan listrik yang berubah-ubah secara periodik. Medan magnet yang kuat diterapkan secara tegak lurus dengan medan listrik, yang menyebabkan partikel bermuatan bergerak dalam lintasan spiral atau lingkaran sehingga di setiap putaran energinya terus meningkat (Ferdinandi *et al.*, 2015). Material

stripper juga harus dipilih dengan tepat supaya efisiensi berkas proton optimum (Kartika dkk, 2023).



Gambar 3 Ilustrasi sederhana sistem pemercepatan partikel bermuatan di dalam siklotron

Siklotron memiliki magnet berbentuk tapal kuda yang menciptakan medan magnet pada lintasan partikel. Medan ini membuat partikel bergerak dalam lintasan melingkar, karena gaya Lorentz yang dihasilkan oleh medan magnet mendorong partikel tersebut untuk bergerak dalam bentuk lingkaran (Ferdí *et al.*, 2015). Siklotron adalah alat yang revolusioner dalam bidang ilmu pengetahuan, memungkinkan pemahaman mendalam tentang struktur atom dan membantu dalam berbagai aplikasi medis untuk produksi radionuklida medis serta industri. Siklotron memiliki beberapa komponen utama yang bekerja bersama untuk mempercepat partikel bermuatan dalam lintasan melingkar, di antaranya adalah elektroda dees, sistem medan

magnet, sistem medan listrik, sumber ion, ruang vakum, sistem pendingin dan sistem ekstraksi. Dengan kerjasama dari semua komponen ini, siklotron dapat mempercepat partikel ke energi tinggi dalam ruang yang relatif kecil, membuatnya sangat berguna untuk penelitian ilmiah dan aplikasi industri.

B. Parameter Fisik Teknologi Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron

Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron bergantung pada beberapa parameter fisik utama yang mempengaruhi efisiensi produksi, kemurnian radionuklida, dan kualitas produk akhir.

1. Jenis, Energi dan Arus Berkas Partikel

Biasanya, proton adalah partikel yang paling umum dipercepat di dalam siklotron untuk produksi radionuklida medis. Selain proton, partikel lain seperti deuteron, triton, He-3 dan He-4 (alfa) mungkin digunakan tergantung pada kebutuhan produksi spesifik dan jenis radionuklida yang dihasilkan. Energi partikel yang diakselerasi dalam siklotron penting untuk memicu terjadinya reaksi nuklir yang diinginkan. Tingkat energi partikel ini harus cukup untuk menembus inti atom target dan menyebabkan reaksi nuklir yang diinginkan. Energi partikel yang tepat bergantung pada jenis radionuklida yang diinginkan dan karakteristik reaksi nuklirnya. Pemilihan energi yang sesuai memastikan bahwa reaksi nuklir terjadi dengan efisiensi tinggi. Energi partikel dapat diukur dengan metode aktivasi susunan foil tembaga (Riana dkk., 2016).

Arus berkas partikel mengacu pada jumlah partikel yang diakselerasi dalam suatu periode waktu. Arus berkas partikel yang tinggi diperlukan untuk memproduksi jumlah radionuklida

yang cukup dalam waktu yang wajar (Kambali *et al.*, 2017). Kontrol arus berkas juga penting untuk menjaga keseimbangan antara produksi radionuklida yang efisien dan mencegah kerusakan pada target nuklir dan sistem akselerator.

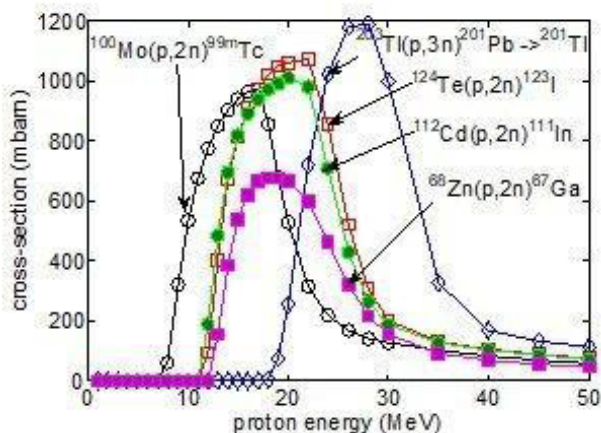
2. Reaksi Nuklir dan Tampang Lintang Reaksi Nuklir

Reaksi nuklir dalam produksi radionuklida medis menggunakan siklotron melibatkan percepatan partikel-partikel bermuatan listrik (biasanya proton) untuk menumbuk inti atom target, sehingga menyebabkan reaksi nuklir yang menghasilkan radionuklida yang diinginkan. Reaksi nuklir yang diinduksi oleh partikel yang diakselerasi dalam siklotron tersebut menghasilkan radionuklida medis yang diinginkan. Beberapa jenis reaksi nuklir yang paling umum digunakan dalam produksi radionuklida medis berbasis siklotron di antaranya reaksi (p,n), (p,2n) dan (p, α). Reaksi (p,nx) artinya reaksi nuklir antara berkas proton dan target yang menghasilkan radionuklida disertai dengan sebanyak n partikel. Sebagai contoh reaksi nuklir untuk produksi radionuklida F-18 dari target O-18 adalah $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ untuk produksi radionuklida I-123 dari target Te-124 adalah $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ dan untuk produksi radionuklida N-13 dari target O-16 adalah $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ (Kambali, 2019).

Tampang lintang reaksi nuklir suatu inti atom didefinisikan sebagai probabilitas bahwa reaksi nuklir dapat terjadi, yang secara fisis dapat ditentukan berdasarkan karakteristik luasan area, dengan pengertian bahwa semakin besar luasan area tersebut maka probabilitas reaksi nuklirnya semakin besar. Satuan standard tampang lintang reaksi nuklir adalah barn, yaitu $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ atau 10^{-24} cm^2 . Tampang lintang bergantung pada berbagai faktor, termasuk energi partikel penembak, sifat-sifat inti, dan sudut tumbukan antara partikel-partikel tersebut.

Tampang lintang sering kali digunakan dalam konteks eksperimen nuklir untuk mengukur probabilitas terjadinya suatu reaksi nuklir tertentu. Pada umumnya,ampang lintang meningkat seiring dengan peningkatan energi partikel penembak. Dalam produksi radionuklida medis, pemahaman tentangampang lintang reaksi nuklir sangat penting untuk merancang dan mengoptimalkan proses produksi radionuklida dengan memilih kondisi tumbukan yang sesuai dan mengontrol parameter-parameter lainnya. Grafikampang lintang reaksi nuklir untuk produksi beberapa radionuklida PET seperti C-11, F-18, O-15, N-13, Cu-64 dan I-124 (Kambali, 2019). Kebanyakan radionuklida medis dapat diproduksi dengan berkas proton yang energinya antara 10-18 MeV terutama untuk radionuklida medis yang digunakan dalam modalitas *Positron Emission Tomography* (PET).

Biasanya untuk produksi radionuklida medis yang digunakan dalam modalitas SPECT diperlukan berkas proton yang lebih tinggi dibandingkan dengan radionuklida medis PET. Hal ini dikarenakan kebanyakan radionuklida SPECT hanya dapat diproduksi dengan reaksi nuklir $(p,2n)$ atau bahkan $(p,3n)$ sedangkan radionuklida medis PET dapat diproduksi dengan reaksi nuklir (p,n) .ampang lintang beberapa radionuklida medis SPECT seperti Ga-67, In-111, I-123, Tl-201 dan Tc-99m dapat dilihat di Gambar 4 (Kambali, 2019). . Dari Gambar 4 tersebut, terlihat bahwa diperlukan proton dengan energi di atas 18 MeV untuk mendapatkan *yield* radioaktif yang cukup besar. Bahkan untuk radionuklida Tl-201 butuh energi proton di atas 25 MeV untuk mendapatkan *yield* yang besar.



Gambar 4 Tampang lintang reaksi nuklir untuk produksi beberapa radionuklida medis SPECT (Kambali, 2019)

3. Bahan Target

Dalam produksi radionuklida medis berbasis siklotron, bahan target adalah bahan yang menjadi sasaran tumbukan dengan partikel bermuatan listrik, seperti proton, untuk menghasilkan radionuklida yang diinginkan. Proses ini melibatkan reaksi nuklir di dalam bahan target yang mengubah inti atomnya dan menghasilkan radionuklida tertentu. Biasanya bahan target yang digunakan adalah bahan dengan jumlah atom yang diperkaya dalam bentuk senyawa kimia tertentu, misalnya atom O-18 yang diperkaya dalam bentuk H_2^{18}O untuk produksi F-18 (Kambali *et al.*, 2016). Pemilihan bahan target tergantung pada jenis radionuklida medis yang ingin diproduksi dan aplikasi medis tertentu yang akan dilayani. Selain itu, pemilihan bahan target juga berkaitan dengan parameter teknis, seperti energi

proton yang digunakan, dan karakteristik fisik dan kimia dari radionuklida yang dihasilkan. Proses pemilihan bahan target dan desain eksperimen sangat penting untuk memastikan produksi radionuklida dengan efisiensi dan kualitas yang optimal.

Dalam kasus tertentu, bahan target yang digunakan tidak perlu diperkaya karena kelimpahannya di alam sudah mencapai 100%, misalnya bahan target Y-89 untuk produksi Zr-89 melalui reaksi nuklir $^{89}\text{Y}(\text{p},\text{n})^{89}\text{Zr}$ (Kambali & Wibowo, 2023). Bahan target dengan kelimpahan alam mencapai 100% biasanya harganya relatif jauh lebih murah dibandingkan dengan bahan target yang diperkaya.

Dewasa ini, logam tanah jarang menjadi primadona karena dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti industri elektronik, kesehatan, otomotif, penerbangan hingga pertahanan. Dalam bidang teknologi radioisotop, logam tanah jarang bahkan dapat digunakan sebagai bahan target untuk produksi radioisotop, di antaranya lanthanum untuk produksi radioisotop cerium-139 melalui reaksi nuklir $^{139}\text{La}(\text{p},\text{n})^{139}\text{Ce}$ (Wibowo & Kambali, 2024), dan ytterbium untuk produksi lutetium-177 melalui reaksi nuklir $^{170}\text{Yb}(\text{d},\text{n})^{177}\text{Lu}$ (Kambali, 2018c).

4. Ketebalan dan Geometri Target

Jangkauan partikel sangat penting dalam penentuan ketebalan atau volume optimum target ketika produksi radionuklida menggunakan berkas partikel (Kambali dkk., 2014). Target yang terlalu tipis menyebabkan kerugian dari sisi berkas partikelnya karena sebagian besar partikel akan lolos menembus target, sedangkan target yang terlalu tebal menyebabkan kerugian dari sisi targetnya itu sendiri karena tidak semua target akan dapat dijangkau oleh partikel dan tidak teraktivasi, sehingga secara ekonomi sangat merugikan. Oleh karena itu, pemilihan

energi berkas partikel, ketebalan dan bentuk geometri target menjadi salah satu kunci utama keberhasilan dalam produksi radionuklida.

Ketebalan target merujuk pada ketebalan bahan yang terkena oleh partikel berenergi tinggi, seperti proton, selama proses produksi radionuklida. Hal ini berhubungan dengan jangkauan partikel di dalam bahan target. Jangkauan partikel ini sangat penting dalam penentuan ketebalan atau volume optimum target ketika produksi radionuklida menggunakan berkas partikel. Target yang terlalu tipis menyebabkan kerugian dari sisi berkas partikelnya karena sebagian besar partikel akan lolos menembus target, sedangkan target yang terlalu tebal menyebabkan kerugian dari sisi targetnya itu sendiri karena tidak semua target akan dapat jangkau oleh partikel dan tidak teraktivasi, sehingga secara ekonomi sangat merugikan. Oleh karena itu, pemilihan energi berkas partikel dan bentuk geometri target menjadi salah satu kunci utama keberhasilan dalam produksi radionuklida (Kambali & Suryanto, 2014; Kambali *et al.*, 2014). Pemilihan ketebalan target penting karena dapat memengaruhi efisiensi produksi dan karakteristik radionuklida yang dihasilkan. Jangkauan partikel di dalam bahan target dapat dihitung dengan perangkat lunak *Stopping and Range of Ion in Matter (SRIM)* (Ziegler *et al.*, 2010).

5. *End-of-Bombardment Yield* dan Radionuklida Impuritas

Ketika energi proton melebihi energi ambang untuk terjadi reaksi nuklir dengan atom target, maka atom target akan menjadi atom radioaktif. Hasil radioaktivitas pada saat akhir penembakan atau *end-of bombardment yield* (Y) tergantung pada jumlah partikel (ϕ) dan lamanya waktu iradiasi (t) dan parameter lain seperti

yang ditunjukkan dalam persamaan (1) berikut (Wibowo & Kambali, 2019):

$$Y = \phi (1 - e^{-\lambda t}) \frac{N_A}{M} \int_{E_i}^{E_{th}} \left[\frac{\sigma(E)}{\rho d(x)} \right] \dots (1)$$

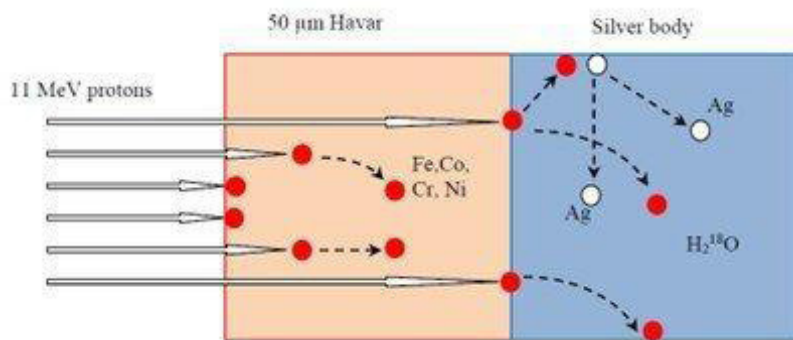
dengan λ = konstanta peluruhan (/s), N_A = bilangan Avogadro (atom/mol), M = massa target (kg), E_{th} = energi ambang (MeV), E_i = energi awal (MeV), $\sigma(E)$ = tampang lintang reaksi nuklir (barn), ρ = densitas target (kg/m³), $d(E)/d(x)$ = daya henti partikel (MeV/m), dE = interval energi (MeV).

Yield radionuklida dapat dihitung dengan menggunakan perangkat lunak berbasis Android yang disebut *CalcuYield* yang dapat diinstal di telepon genggam sehingga dapat dibawa kemana-mana. Perangkat lunak *CalcuYield* tersebut dibuat dan dikembangkan pertama kali oleh Wibowo dan Kambali (Wibowo & Kambali, 2019).

Selama proses produksi radionuklida, selain dihasilkan radionuklida yang diinginkan, dihasilkan juga radionuklida impuritas (Bonay dkk., 2016). Dalam riset produksi radionuklida F-18 dengan proton 11 MeV telah dilakukan analisis pengaruh dosis iradiasi terhadap *yield* radionuklida F-18 yang menunjukkan bahwa semakin besar dosis iradiasi maka semakin besar pula *yield* radionuklida impuritas yang dihasilkan selama iradiasi (Kambali *et al.*, 2017).

Untuk pertama kalinya, analisis terhadap radionuklida impuritas tersebut dapat dijelaskan secara fisika melalui proses *recoiling* dan *sputtering* yang terjadi pada saat produksi radionuklida F-18 sehingga di dalam larutan F-18 pasca iradiasi

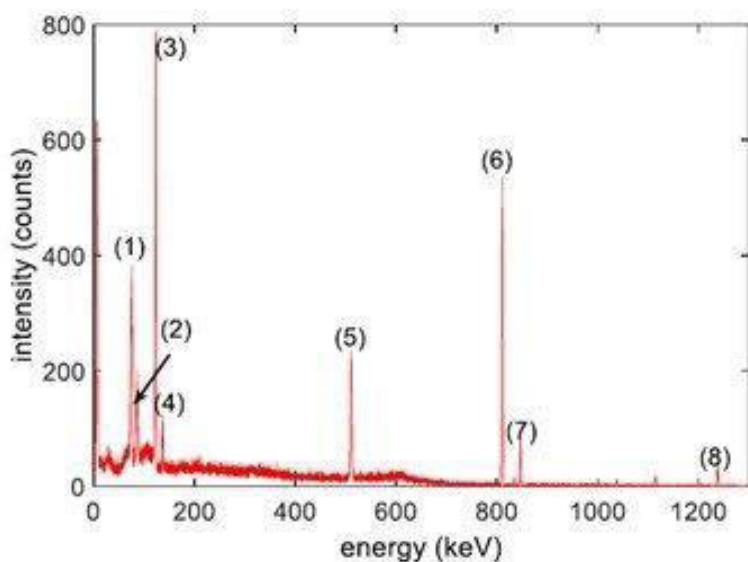
ditemukan radionuklida impuritas yang berasal dari selongsong target seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 (Kambali *et al.*, 2019).



Gambar 5 Ilustrasi lintasan atom radioaktif Co-56 dan Ag-110m yang jatuh ke dalam larutan F-18 melalui mekanisme atom rekoil dan sputter (Kambali *et al.*, 2019).

Selain radionuklida impuritas, selama proses iradiasi juga dihasilkan beberapa radionuklida *by-products* (produk sampingan) dari reaksi nuklir antara neutron dan bahan-bahan penyusun sistem target (Kambali *et al.*, 2016) dan bahan-bahan lain di sekitar mesin siklotron. Hal ini tentu menimbulkan kesadaran yang lebih terhadap keselamatan radiasi selama proses produksi radionuklida medis karena radionuklida residu dapat berupa radionuklida yang berumur paruh relatif panjang seperti yang ditemukan pada dinding ruangan siklotron CS30 yang meskipun sudah tidak beroperasi selama beberapa tahun, radionuklida residu tersebut masih terdeteksi (Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016a).

Semakin besar energi proton, semakin banyak pula jenis radionuklida impuritas yang dihasilkan. Hal ini terkonfirmasi secara teoritis (Kambali, 2021b) dan eksperimen untuk energi proton 11 dan 18 MeV (Kambali *et al.*, 2020; Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016b). Dari hasil identifikasi radionuklida impuritas untuk produksi radionuklida F-18 dengan proton 11 MeV hanya ditemukan radionuklida impuritas Co-56, sedangkan dengan iradiasi proton 18 MeV dihasilkan lebih banyak jenis radionuklida impuritas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (Kambali *et al.*, 2020).



Gambar 6 Spektrum sinar gamma impuritas radioaktif yang terdeteksi satu bulan setelah iradiasi target air diperkaya dengan proton 18 MeV. Keterangan: (1) sinar-X, (2) Cd-109, (3,4) Co-57, (5) Ni-57, (6) Co-58, (7) Co-56 dan (8) Ni-57 (Kambali *et al.*, 2020).

Studi terkait radionuklida impuritas ini sangat penting untuk dilakukan mengingat persyaratan jumlah total radioaktivitas radionuklida impuritas di dalam larutan F-18-Fluorodeoxy Glucose (^{18}FDG) tidak boleh lebih dari 0.1% atau berdasarkan *European Pharmacopoeia* atau 0.5% berdasarkan *US Pharmacopoeia* demi keselamatan pasien (IAEA, 2021). Dari studi lebih lanjut ditemukan bahwa semakin besar energi proton yang digunakan untuk produksi radionuklida F-18, maka semakin banyak juga radionuklida impuritas yang dihasilkan (Kambali, 2021b).

6. Sistem target

Sistem sistem target memainkan peran penting dalam memproduksi radionuklida yang diinginkan. Di dalam sistem target terdapat beberapa komponen diantaranya bahan target, selongsong target, pendingin target dan komponen lain termasuk sistem kontrol (Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016b). Desain sistem target dapat berbeda-beda tergantung pada jenis siklotron, meskipun inti dari disain tersebut adalah untuk meminimalkan penggunaan bahan target dan radiasi yang dihasilkan serta mengoptimalkan *yield* radionuklida yang diinginkan.

Sebelum sistem target didesain dan digunakan, perlu dilakukan studi keandalannya, terutama terkait kemampuan sistem target tersebut dalam menahan panas yang diakibatkan oleh iradiasi proton (Kambali *et al.*, 2009).

Pemilihan bahan komponen sistem target harus dilakukan dengan hati-hati karena bahan-bahan tersebut dapat teraktivasi oleh berkas proton maupun neutron sekunder sehingga dapat menimbulkan bahaya radiasi eksternal bagi pekerja radiasi. Khusus untuk neutron sekunder, partikel ini dapat mengaktivasi tidak hanya bahan-bahan di dalam sistem target, tetapi juga

bahan perisai radiasi yang ada di fasilitas siklotron (Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016b). Potensi bahaya radiasi ini mendorong studi yang komprehensif terhadap pemilihan bahan untuk perisai radiasi (Aliyah *et al.*, 2023a; Aliyah dkk, 2023b).

C. Radionuklida PET dan SPECT

Di dalam kedokteran nuklir untuk diagnosis, digunakan dua jenis modalitas pencitraan organ tubuh, yaitu modalitas PET dan SPECT. Kedua modalitas tersebut memanfaatkan radiasi sinar gamma yang dipancarkan dari proses peluruhan radionuklida dengan menggunakan kamera gamma, namun ada beberapa perbedaan penting dalam kedua modalitas tersebut. Dalam modalitas PET, radionuklida yang digunakan adalah radionuklida pemancar partikel positron (β^+) yang selanjutnya berubah menjadi sinar gamma pada saat positron berinteraksi dengan elektron bebas, sedangkan dalam modalitas SPECT, radionuklida yang digunakan adalah radionuklida pemancar gamma. Dalam perkembangan modalitas PET, terdapat beberapa radionuklida pemancar positron yang dapat dimanfaatkan, meskipun sebagian besar diagnosis kelainan organ dengan modalitas PET menggunakan radionuklida fluorine-18 (F-18) (Kambali & Suryanto, 2020). Beberapa radionuklida pemancar positron yang telah secara luas digunakan dalam diagnosis dan yang masih dalam tahap penelitian aplikasi pada pasien antara lain F-18, O-15, C-11, N-13, Cu-64, Y-86 dan I-123 (Kambali, 2019), Ga-68, dan Ga-67 yang digunakan dalam diagnosis berbagai penyakit. Radionuklida Ga-68 dapat diproduksi dengan 3 jenis reaksi nuklir yang berbeda, yaitu (p,n), (p,2n) dan (α , 2n) meskipun *yield* radionuklida Ga-68 secara teori paling banyak dihasilkan dari reaksi nuklir (p,n) (Kambali & Wibowo, 2019).

Selain itu, radionuklida Ga-67 berpotensi dapat produksi dengan reaksi nuklir (p,n) dan (p,2n) (Kambali, 2020).

Dalam modalitas SPECT digunakan radionuklida pemancar gamma dengan rentang energi gamma antara 100 – 200 keV untuk menghasilkan citra yang optimal. Saat ini, lebih dari 80% kedokteran nuklir di dunia menggunakan Tc-99m untuk pencitraan berbagai kelainan organ tubuh. Beberapa radionuklida pemancar gamma yang digunakan dalam modalitas SPECT di antaranya adalah I-124, In-111 dan Tc-99m. Dengan melihat data energi ambang untuk produksi radionuklida SPECT, hanya Tc-99m yang dapat diproduksi dengan siklotron yang ada di RS Kanker Dharmais Jakarta, sedangkan radionuklida I-123 dan In-111 hanya bisa diproduksi dengan siklotron yang ada di MRCCC Siloam Hospital, Jakarta (Kambali, 2019).

Studi produksi Tc-99m dengan siklotron secara teoritis sebelumnya telah dibahas secara komprehensif (Kambali, 2017), sedangkan secara eksperimen, produksi radionuklida Tc-99 menggunakan siklotron 11 MeV menunjukkan *yield* radionuklida Tc-99m yang belum cukup untuk pelayanan kedokteran nuklir.

D. Radionuklida Terapi dan Teranostik

Untuk tujuan terapi, dapat digunakan radionuklida yang dalam proses peluruhannya memancarkan alfa, beta maupun elektron Auger, meskipun diketahui bahwa radionuklida pemancar alfa mempunyai daya rusak yang lebih besar terhadap sel target (kanker) dan tidak merusak sel jaringan normal di sekitarnya karena jangkauan partikel alfa sangat pendek, sehingga radionuklida pemancar alfa sangat tepat digunakan untuk *targeted therapy*. Beberapa radionuklida yang digunakan untuk

terapi di antaranya adalah Sm-153 (Kambali, 2018a), Ir-192 (Rezki *et al.*, 2020), I-125, At-211, Sc-47, dan Re-186.

Secara umum, radionuklida terapi dapat diproduksi dengan berkas proton dengan energi ambang yang relatif rendah, kecuali untuk radionuklida At-211 yang memerlukan partikel alfa dengan energi ambang yang sangat tinggi, yaitu 19,36 MeV. Secara teoritis, baik radionuklida Pd-103, Ac-225, Cu-67, Y-90 maupun Re-186 dapat diproduksi dengan ketiga siklotron yang ada di RS di Jakarta. Selain dengan proton, radionuklida terapi dapat diproduksi dengan berkas proton maupun partikel lain seperti partikel deutron untuk produksi Ir-192 (Rezki *et al.*, 2020) dan partikel alfa untuk produksi At-211 (Kambali, 2018b).

Selain dapat digunakan untuk terapi penyembuhan penyakit kanker, ada pula radionuklida medis yang berfungsi untuk terapi paliatif, yaitu untuk mengurangi sakit pada pasien penderita kanker stadium 4. Radionuklida tersebut adalah Sm-153 yang memancarkan partikel beta. Radionuklida Sm-153 biasanya diproduksi dengan reaktor nuklir, namun berpotensi juga untuk diproduksi dengan siklotron yang mempercepat partikel alfa (Kambali, 2018a).

Radionuklida teranostik yang paling populer saat ini adalah Lu-177 dan Cu-64. Radionuklida Lu-177 dapat digunakan untuk diagnosis dengan modalitas SPECT dan terapi karena memancarkan partikel gamma dan beta, sedangkan radionuklida Cu-64 digunakan untuk diagnosis dengan modalitas SPECT dan terapi karena memancarkan partikel positron dan beta. Radionuklida Lu-177 dapat diproduksi dengan menggunakan siklotron (Kambali, 2018c) maupun reaktor nuklir (Maiyesni *et al.*, 2019), sedangkan radionuklida Cu-64 hanya dapat

diproduksi dengan siklotron (Kambali, 2014b; Kim *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2017).

E. Metode Alternatif dalam Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron

Saat ini, peneliti di dunia sedang berlomba-lomba untuk mencari metode alternatif atau metode baru dalam produksi radionuklida medis berbasis siklotron. Salah satu metode alternatif tersebut adalah dengan iradiasi tak langsung yang memerlukan 2 target, yaitu target primer dan target sekunder (Suryanto & Kambali, 2018). Target primer diiradiasi dengan berkas yang dihasilkan dari siklotron sehingga terjadi reaksi nuklir, misalnya reaksi (p,n) dan $(p,2n)$. Dari reaksi nuklir tersebut dihasilkan berkas neutron sekunder yang selanjutnya ditembakkan ke target sekunder yang akan menghasilkan radioisotop yang diinginkan.

Metode iradiasi tak langsung ini merupakan metode yang relatif baru, sehingga masih perlu untuk dikaji lebih mendalam lagi, terutama terkait pemilihan target primer dan geometri target primer yang mampu menghasilkan neutron sekunder dengan fluks yang tinggi pada rentang energi neutron cepat. Biasanya, hasil iradiasi target primer ini menghasilkan neutron sekunder yang terdistribusi dari energi rendah sampai energi cepat, walaupun mayoritas neutron sekunder tersebut berada pada rentang energi cepat (Kambali *et al.*, 2023; Kambali dkk, 2023; Kambali dkk, 2024).

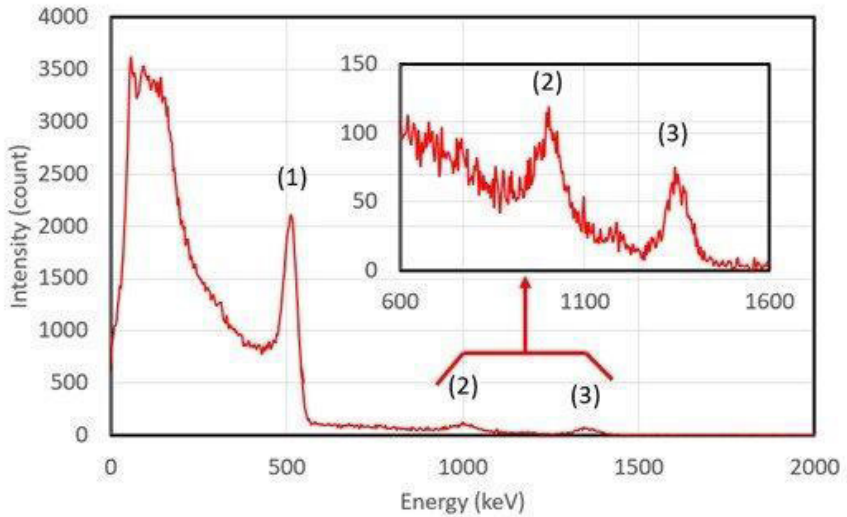
Metode iradiasi tak langsung ini pertama kali ditemukan secara tidak sengaja (Suryanto & Kambali, 2018) ketika mereka menembakkan berkas proton ke target foil havar yang ditumpuk dengan foil nikel. Dari proses iradiasi tersebut didapatkan radionuklida Co-57 dan Ni-57 pada foil nikel. Setelah dianalisis, ternyata reaksi nuklir yang dominan terjadi

pada foil nikel tersebut adalah $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$. Neutron sekunder yang menumbuk foil nikel berasal dari foil havar dari reaksi nuklir antara proton dan havar. Metode iradiasi tak langsung ini selanjutnya dikembangkan dengan cara mencari bahan target yang dapat menghasilkan fluks neutron cepat yang lebih banyak.

Studi terbaru (Kambali & Febrianto, 2021) dengan simulasi menggunakan software PHITS 3.16 (Yamaguchi *et al.*, 2020) menunjukkan bahwa fluks neutron cepat yang dihasilkan dari iradiasi berkas proton 10 MeV terhadap titanium (Ti) dengan variasi ketebalan antara 1-5 mm optimum ketika tebal target Ti adalah 3 mm yang menghasilkan fluks neutron sekunder total $2,16 \times 10^{11}$ n/cm²s. Karakterisasi fluks neutron secara eksperimen telah dilaporkan oleh Tursinah, dkk (Tursinah *et al.*, 2025). Fluks neutron sekunder tersebut dapat digunakan untuk menghitung *yield* radioaktivitas (Y) Cu-64 yang dihasilkan dari reaksi nuklir antara neutron sekunder dan target Zn-64 melalui reaksi $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$. Dengan menggunakan data fluks neutron sekunder dapat dihitung distribusi *yield* radioisotop Cu-64. Hasil perhitungan *yield* radioaktivitas Cu-64 maksimum ketika tebal target Ti 3 mm, yaitu dengan total *yield* sekitar 2,06 MBq/ μAjam . Hasil perhitungan ini bahkan lebih besar secara signifikan dibandingkan dengan hasil yang dilaporkan oleh Auditore dkk (Auditore *et al.*, 2017) meskipun mereka menggunakan proton dengan energi 30 MeV dan target primer air diperkaya O-18. Fluks neutron sekunder dan *yield* radionuklida Cu-64 dapat ditingkatkan dengan cara memvariasi jenis dan tebal target primer untuk meningkatkan fluks neutron sekunder.

Dengan fluks neutron sekunder yang bervariasi, maka total *yield* radioisotop Cu-64 yang dihasilkan juga bervariasi antara 50,3 – 79,7 MBq/ μAjam (Kambali *et al.*, 2023). *Yield* radioisotop Cu-64 yang diperoleh dengan metode iradiasi neutron sekunder

telah dilaporkan pertama kali oleh Kambali, dkk pada Gambar 7 (Kambali *et al.*, 2024).



Gambar 7 Spektrum radioisotop Cu-64 hasil iradiasi target primer Ti dan target sekunder Zn-64 (Kambali *et al.*, 2024)

IV. KONTRIBUSI ILMIAH DALAM RISET TEKNOLOGI PRODUKSI RADIONUKLIDA MEDIS BERBASIS SIKLOTRON

Riset teknologi radionuklida medis berbasis siklotron yang telah dilakukan selama beberapa tahun ini telah berkontribusi terhadap kemajuan perkembangan riset dalam bidang tersebut. Beberapa kontribusi yang paling menonjol adalah sebagai berikut:

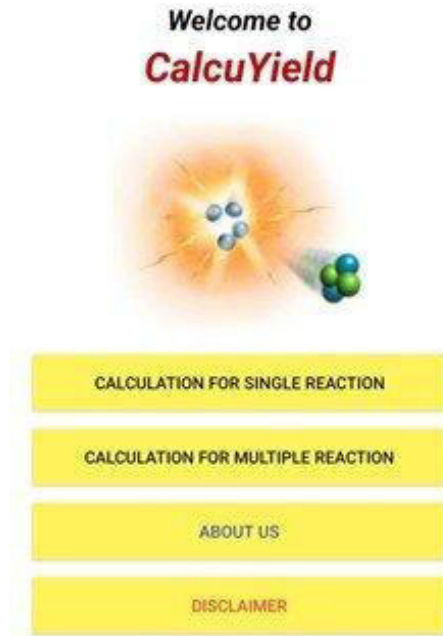
Pertama, penemuan metode baru dalam produksi radionuklida medis. Dalam makalah berjudul “*A novel method for Ni-57 and Co-57 production using cyclotron-generated secondary neutrons*” yang terbit di jurnal Atom Indonesia, 2018, volume 44(2), 81-87 (Suryanto & Kambali, 2018). Di dalam makalah tersebut dijelaskan bahwa neutron sekunder yang dihasilkan dari reaksi nuklir antara proton dengan foil havar dapat digunakan untuk produksi radionuklida Ni-57 dan Co-57 yang keduanya merupakan pemancar positron sehingga dapat digunakan untuk diagnosis kanker dengan modalitas PET.

Kedua, penjelasan proses fisika (atom rekoil dan *sputtering*) yang terjadi pada radionuklida impuritas yang terdeteksi di dalam larutan F-18. Penjelasan tersebut merupakan terobosan baru yang diusulkan oleh Kambali dkk (Kambali *et al.*, 2019) seperti yang telah dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi tinggi, *International Journal of Technology*, 2019, volume 10(2), halaman 300-308. Di dalam makalah tersebut disebutkan bahwa radionuklida pengotor yang terdeteksi di dalam larutan F-18 berasal dari interaksi antara proton dengan foil havar dan antara neutron sekunder dengan selongsong target

yang terbuat dari perak. Radionuklida tersebut selanjutnya jatuh ke dalam larutan F-18 melalui peristiwa atom rekoil dan *sputtering* selama proses produksi F-18.

Ketiga, penjelasan teoritis dan analisis hasil eksperimen radionuklida impuritas dan radionuklida produk sampingan (*by-product*) yang dihasilkan selama proses produksi radionuklida F-18. Hasil analisis tersebut telah dipublikasi di jurnal global bereputasi tinggi, *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 2016, volume 39(2), halaman 403-412. Judul artikel tersebut adalah *Radioactive by-products of a self-shielded cyclotron and the liquid target system for routine F-18 production* (Kambali, Suryanto, & Parwanto, 2016b). Di dalam makalah tersebut dijelaskan secara detail reaksi nuklir dan tampang lintang reaksi nuklir radionuklida-radionuklida yang terdeteksi selama dan setelah proses produksi F-18. Bahkan identifikasi radionuklida yang terdeteksi di tembok ruangan siklotron juga dijelaskan secara ilmiah termasuk darimana asal reaksi nuklirnya. Informasi ini sangat bermanfaat bagi proses pemisahan dan pemurnian radionuklida, serta dapat digunakan sebagai data untuk kepatuhan terhadap prosedur keselamatan pekerja radiasi.

Keempat, membuat terobosan baru dengan menciptakan perangkat lunak untuk perhitungan *yield* radionuklida medis berbasis Android yang telah diterbitkan di *Journal of Physics: Conference Series* 1198(2), 2019, halaman 022008 (Wibowo & Kambali, 2019). Perangkat lunak tersebut, yang diberi nama “*CalcuYield*” (Gambar 8) dapat digunakan untuk menghitung secara teoritis *yield* radionuklida medis melalui telepon genggam yang menggunakan sistem operasi Android. Perangkat lunak berbasis Android ini mudah dibawa kemana-mana sehingga bisa digunakan setiap saat.



Gambar 8 Tampilan utama perangkat lunak *CalcuYield*

Kelima, analisis perbandingan reaksi nuklir untuk produksi radionuklida Ga-68 yang terbit di *Journal of Physics: Conference Series* 1198, 2019, halaman 022003 dengan judul makalah “*Comparison of Ga-68 production yields from $(p,2n)$, $(\alpha,2n)$ and (p,n) nuclear reactions applicable for cancer diagnosis*” (Kambali & Wibowo, 2019). Dalam makalah tersebut dijelaskan 3 jenis reaksi nuklir, yaitu $(p,2n)$, $(\alpha,2n)$ dan (p,n) yang dapat digunakan untuk produksi radionuklida Ga-68. Dari ketiga jenis reaksi nuklir tersebut, diperoleh kesimpulan bahwa reaksi

(p,n) menghasilkan *yield* radionuklida Ga-68 yang jauh lebih besar dibandingkan dengan reaksi nuklir yang lain. Hasil riset ini dapat membantu pemilihan metode terbaik dalam produksi radionuklida Ga-68.

Keenam, keberhasilan eksperimen metode baru dalam produksi radioisotop Cu-64 berbasis neutron sekunder untuk pertama kalinya yang terbit di jurnal Nuclear Science and Engineering, 2024 dengan judul "*Development of target holder for the first experiment on an alternative route for Cu-64 radioisotope production by secondary neutron irradiation of ^{64}ZnO target*". Dalam makalah ini dijelaskan secara rinci metode baru dalam produksi radioisotop Cu-64 dengan sumber neutron berasal dari interaksi antara berkas proton dan foil titanium. Selanjutnya neutron sekunder tersebut digunakan untuk mengiradiasi target ^{64}ZnO . Dari hasil iradiasi tersebut dihasilkan radioisotop Cu-64 dan tanpa pengotor radioaktif.

Ketujuh, tiga paten yang berhubungan dengan teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron telah dihasilkan dengan judul: (1) Metode Produksi Radioisotop Tembaga-64 (Cu-64) dengan Menggunakan Neutron Sekunder dan Alat Pemegang Target Padat (Nomor Paten: P00202314813). (2) Alat Pemegang target Ganda pada Produksi Radioisotop F-18 dan Cu-64 Secara Simultan Berbasis Siklotron (Nomor Paten: P00202415134). (3) Bahan Stripper Foil menggunakan Polikristalin Grafit (Nomor Paten: P00202314783).

V. ANALISIS *STRENGTHS WEAKNESSES OPPORTUNITIES* DAN *THREATS* (SWOT)

Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron memiliki kekuatan (*strengths*), kelemahan (*weaknesses*), peluang (*opportunities*) dan ancaman (*threats*) yang jika dikelola dengan baik dan tepat akan memberikan dampak yang luar biasa bagi keberhasilan layanan kedokteran nuklir nasional menuju visi Indonesia Emas 2045.

A. *Strengths* (Kekuatan)

Beberapa kekuatan teknologi produksi radionuklida medis antara lain:

Pertama, produksi radionuklida perunut dapat membantu pencitraan penyakit kanker dan diagnosis yang tepat dan akurat sejak tahap awal (*early stage*) terbentuknya kanker (Kambali, 2019). Dengan diagnosis yang akurat pada tahap awal, pengobatan dapat direncanakan lebih efektif, sehingga meningkatkan peluang keberhasilan terapi dan kualitas hidup pasien.

Kedua, radionuklida medis dapat digunakan untuk pengobatan kanker pada target yang spesifik sehingga meminimalisasi kerusakan sel sehat. Selain itu, terapi paliatif pasien penderita kanker stadium lanjut dapat meningkatkan kualitas hidupnya. Teknologi ini memungkinkan penghantaran radiasi langsung ke sel kanker tanpa merusak jaringan sehat di sekitarnya, sehingga mengurangi efek samping dan meningkatkan efikasi

terapi. Riset teknologi siklotron dalam produksi radionuklida medis membuka peluang besar dalam pengobatan kanker yang lebih aman, efektif, dan spesifik. Pendekatan ini tidak hanya meminimalkan dampak negatif pada sel sehat tetapi juga memberikan harapan baru melalui terapi paliatif, misalnya dengan radioisotop Ir-192 (Rezki *et al.*, 2020) yang mampu meningkatkan kualitas hidup pasien kanker stadium lanjut. Dengan investasi yang berkelanjutan dalam riset ini, dunia medis dapat semakin mendekati era pengobatan kanker yang lebih personal, presisi, dan berpusat pada kebutuhan pasien.

Ketiga, dapat mempromosikan riset radiofarmaka baru untuk berbagai aplikasi medis selain diagnosis dan terapi kanker. Riset teknologi produksi radionuklida berbasis siklotron memainkan peran penting dalam memperluas aplikasi medis radionuklida di luar kanker, seperti untuk penyakit kardiovaskular, neurologi, infeksi, dan metabolisme. Selain itu, teknologi ini mendukung pengembangan radiofarmaka baru yang dapat digunakan dalam pencitraan diagnostik (Kambali, 2020), studi farmakologi, terapi (Kambali & Febrianto, 2022), dan penelitian penyakit langka. Dengan fokus riset yang terus berkembang, siklotron menjadi kunci dalam mendorong inovasi di bidang kedokteran nuklir untuk masa depan.

Keempat, radionuklida medis (Wibowo & Kambali, 2021) memiliki implikasi yang nyata terhadap studi biologi radiasi, sehingga membantu peneliti dalam memahami efek paparan radiasi terhadap sel biologis. Pengetahuan ini sangat krusial dalam penentuan standar dan pedoman keselamatan radiasi.

Kelima, mengingat sebagian besar radionuklida medis berumur relatif pendek (Kambali, 2017), sehingga penguasaan

teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron dapat menyelesaikan ketergantungan produk impor yang sangat mahal.

B. *Weaknesses* (Kelemahan)

Beberapa kelemahan terkait teknologi produksi radionuklida medis antara lain: investasi awal yang tinggi. Biaya pengadaan dan instalasi siklotron sangat mahal (juga memerlukan shielding, ruang bunker, dan fasilitas radiokimia). Operasi dan pemeliharaan yang kompleks dan membutuhkan tenaga ahli (fisikawan medis, radiokimiawan, insinyur) serta perawatan rutin dan suku cadang mahal. Selain itu, keterbatasan jangkauan distribusi karena banyak radionuklida memiliki waktu paruh pendek (misalnya F-18 hanya 110 menit), sehingga harus segera digunakan dan tidak bisa didistribusikan jauh (Kambali *et al*, 2016).

Produksi radioisotop di siklotron, meskipun efisien dan sangat bermanfaat secara klinis, memiliki kelemahan lain yang menjadi ciri khas dalam produksi radioisotop yaitu risiko keselamatan radiasi dan limbah (Rasito *et al*, 2025). Risiko tinggi tersebut terjadi selama penggantian target padat, pemeliharaan sistem *beamline*, dan proses radiokimia manual (seperti elusi dan sintesis tracer). Oleh karena itu diperlukan langkah-langkah konkrit dalam mengurangi atau bahkan mengatasi kelemahan-kelemahan tersebut.

C. *Opportunities* (Peluang)

Radionuklida medis adalah komponen penting dalam bidang kedokteran nuklir, terutama dalam diagnostik dan terapi berbagai penyakit, termasuk kanker. Riset teknologi produksi radionuklida medis memainkan peran strategis untuk mendukung

visi Indonesia Emas 2045. Relevansi radionuklida medis dalam cita-cita menuju Indonesia Emas 2045 di antaranya adalah:

Pertama, peningkatan kesehatan nasional. Pemanfaatan radionuklida medis untuk diagnostik dini (Kambali & Wibowo, 2019) dan terapi penyakit kritis (Kambali, 2018b) dapat meningkatkan angka harapan hidup masyarakat. Aksesibilitas teknologi ini dapat menurunkan ketergantungan terhadap impor, meningkatkan kemandirian, dan mendukung keberlanjutan sistem kesehatan nasional.

Kedua, riset teknologi produksi radionuklida medis merupakan pendorong industri teknologi tinggi. Industri radionuklida medis dapat menjadi salah satu pilar ekonomi berbasis inovasi yang menciptakan lapangan kerja bagi tenaga ahli lokal. Produk radionuklida medis yang kompetitif dapat menjadi komoditas ekspor yang memperkuat ekonomi berbasis teknologi. Ketiga, dukungan untuk kemandirian energi dan teknologi. Fasilitas penelitian seperti reaktor nuklir dan akselerator partikel menjadi tulang punggung produksi radionuklida. Pengembangan ini selaras dengan upaya penguasaan teknologi energi nuklir di masa depan. Keempat, teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron memberikan dukungan terhadap Rencana Pembangunan Jangka Menengah (RPJMN) serta visi nawa cita 2024-2029 yang mengutamakan pembangunan infrastruktur teknologi strategis dan pemberdayaan sumberdaya manusia (SDM) unggul. Dalam konteks teknologi radionuklida medis, dukungan tersebut dapat diwujudkan melalui langkah-langkah diantaranya alokasi anggaran khusus, yaitu penyediaan dana untuk riset teknologi nuklir medis dalam anggaran kesehatan dan pendidikan nasional. Kerjasama multilateral yang melibatkan organisasi internasional seperti *International Atomic Energy Agency* (IAEA) untuk pengembangan teknologi nuklir medis

secara berkelanjutan. Selain itu fokus pada pemerataan dengan cara pendistribusian fasilitas kedokteran nuklir ke seluruh wilayah Indonesia untuk mendukung inklusivitas layanan kesehatan (Kambali *et al.*, 2020). Pengembangan teknologi produksi radionuklida medis sejalan dengan visi *Indonesia Emas 2045* dan RPJM 2024-2029 dalam *Asta Cita*. Dengan penguatan infrastruktur, SDM, dan kebijakan strategis, Indonesia dapat mencapai kemandirian teknologi, meningkatkan kualitas layanan kesehatan, serta menjadi pemimpin regional di bidang teknologi nuklir medis. Langkah ini tidak hanya mendorong kesejahteraan nasional tetapi juga memperkuat posisi Indonesia di panggung global.

D. Threats (Ancaman)

Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron menghadapi berbagai ancaman terkait lingkungan, SDM, regulasi, ekonomi, dan logistik. Namun, dengan strategi yang terintegrasi dan dukungan kebijakan yang tepat, ancaman dan tantangan ini dapat diatasi untuk mendorong kemandirian Indonesia dalam teknologi kedokteran nuklir. Langkah ini tidak hanya meningkatkan layanan kesehatan nasional tetapi juga berkontribusi pada visi Indonesia Emas 2045. Beberapa tantangan dalam riset teknologi produksi radionuklida medis antara lain: pertama permasalahan sistem target (Kambali *et al.*, 2014). Bahan target yang digunakan dalam produksi radionuklida harus tahan terhadap radiasi dan suhu yang sangat tinggi. Pemilihan material yang tahan terhadap kondisi tersebut dan pada saat yang sama tidak menghasilkan radionuklida impuritas merupakan tantangan yang sangat besar yang sampai sekarang belum terpecahkan. Selain itu, manajemen pendinginan target akibat panas yang dihasilkan oleh radiasi partikel adalah

hal yang kritis. Sistem pendingin yang efisien sangat diperlukan untuk menghindari pemanasan berlebih pada target dan potensi kerusakan bahan target.

Kedua, radionuklida impuritas. Produksi radionuklida medis selalu menghasilkan radionuklida impuritas yang terjadi karena reaksi nuklir antara partikel dengan pengotor bahan target dan material lain yang ada di sekitar target (Kambali *et al.*, 2016). Pemisahan radionuklida impuritas ini merupakan tantangan teknis dalam mendapatkan produk akhir yang memenuhi persyaratan kedokteran nuklir.

Ketiga, *yield* radionuklida. Radioaktivitas tinggi (Kambali & Wibowo, 2023) sangat penting dalam produksi radionuklida medis untuk memastikan kecukupan radioaktivitasnya dan pasokan yang hemat biaya. Keempat, kontrol kualitas. Memastikan konsistensi dan keandalan radioisotop yang dihasilkan sangat penting untuk aplikasi medis. Langkah-langkah pengendalian kualitas diperlukan untuk memantau proses produksi dan memverifikasi kemurnian dan aktivitas produk akhir.

Keempat, keselamatan radiasi. Paparan radiasi selama proses produksi radionuklida medis berbasis siklotron terhadap pekerja radiasi maupun peneliti yang terlibat harus menjadi perhatian yang utama. Oleh karena itu, penggunaan perisai radiasi yang tepat, pengawasan, dan protokol keselamatan yang ketat sangat penting untuk meminimalisasi paparan radiasi (Kambali *et al.*, 2016). Kelima, kepatuhan terhadap peraturan. Produksi radionuklida tunduk kepada peraturan yang sangat ketat. Pemenuhan standar proteksi radiasi, perolehan ijin yang diperlukan, dan kepatuhan terhadap peraturan dapat menjadi proses yang rumit dan memakan waktu. Keenam, biaya dan aksesibilitas. Dalam hal alat dan infrastruktur, siklotron

memerlukan investasi awal yang relatif tinggi. Hal ini dapat menjadi hambatan dalam pendirian fasilitas baru, terutama di daerah dengan sumber daya terbatas.

Ancaman dan tantangan tersebut diatas seharusnya bisa menjadi peluang yang besar dalam penguasaan teknologi produksi radionuklida medis jika pemangku kebijakan memberikan perhatian khusus terhadap permasalahan yang ada, sehingga diharapkan kedokteran nuklir Indonesia akan semakin maju dan beban kesehatan masyarakat akibat meningkatnya penyakit kanker dapat segera dikurangi (Kambali, 2020).

E. Analisis Rantai Pasokan Radionuklida Medis Berbasis Siklotron

Rantai pasokan radionuklida medis berbasis siklotron melibatkan serangkaian langkah mulai dari ketersediaan fasilitas siklotron, riset teknologi produksi sebelum radionuklida tersebut diproduksi secara massal dan selanjutnya pendistribusian radionuklida yang digunakan dalam diagnosis dan terapi medis, terutama dalam bidang kedokteran nuklir. Siklotron adalah alat percepatan partikel yang digunakan untuk menghasilkan radionuklida tertentu yang tidak dapat diperoleh dari reaktor nuklir. Radionuklida yang dihasilkan dan diproses kemudian didistribusikan ke rumah sakit atau pusat kedokteran nuklir. Karena banyak radionuklida medis memiliki waktu paruh yang sangat pendek (misalnya, Fluor-18 hanya memiliki waktu paruh sekitar 110 menit (Kambali *et al.*, 2019), distribusinya harus sangat cepat.

Radionuklida sering dikirim menggunakan kendaraan khusus yang dilengkapi dengan perangkat pelindung radiasi untuk menghindari paparan radiasi pada pengemudi atau publik. Karena stabilitasnya yang sangat rendah, radionuklida

ini biasanya harus digunakan dalam beberapa jam setelah diproduksi, maka distribusi logistiknya memerlukan koordinasi yang sangat baik. Setelah sampai di rumah sakit atau pusat medis, radionuklida digunakan untuk membuat produk farmasi nuklir. Produk ini digunakan dalam prosedur diagnostik atau terapeutik. Seluruh proses ini juga menghasilkan limbah radioaktif yang harus dikelola dengan aman. Limbah ini dapat berupa bahan sisa dari produksi radionuklida (Kambali, 2020a; Kambali, 2020b), limbah medis dari penggunaan radionuklida dalam pasien, atau limbah dari peralatan yang digunakan dalam produksi. Pengelolaan limbah ini penting untuk menghindari paparan radiasi pada manusia dan lingkungan. Sepanjang rantai pasokan, ada pengawasan ketat oleh badan regulasi seperti Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) atau Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) untuk memastikan keamanan, kualitas, dan efektivitas radionuklida medis yang digunakan.

Tantangan dalam rantai pasokan radionuklida medis di antaranya adalah waktu paruh radionuklida medis relatif pendek (Kambali, 2019) sehingga proses produksi dan distribusi harus dilakukan dalam waktu yang sangat cepat agar produk tetap efektif.

VI. KESIMPULAN

Semakin meningkatnya kasus kanker di Indonesia dan di dunia pada umumnya, membuat para peneliti berlomba-lomba untuk membantu menyelesaikan permasalahan kanker. Masalah paling krusial pada kanker adalah tingginya angka kematian dan beban ekonomi yang besar bagi pasien dan keluarga, serta rendahnya kesadaran akan pentingnya deteksi dini dan pencegahan. Saat ini, teknologi nuklir berbasis radioisotop/radionuklida dipercaya sebagai metode yang paling akurat dalam diagnosis kanker karena radioisotop dapat mengikuti proses metabolisme yang terjadi di dalam sel. Dengan demikian, penguasaan teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron sangat diperlukan dalam mendukung ketahanan kedokteran nuklir Indonesia. Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron meliputi teknologi pemilihan dan penentuan geometri target dan sistem target, metode produksi, radioaktivitas hasil iradiasi dan impuritas radioaktif yang dihasilkan selama proses produksi (Kambali *et al.*, 2016).

Berbagai jenis radionuklida dapat dimanfaatkan dalam kedokteran nuklir, baik untuk diagnosis maupun terapi. Sebagian besar radionuklida medis dapat diproduksi dengan berkas proton yang dihasilkan dari siklotron dengan energi 10-30 MeV (Kambali, 2019). Radionuklida impuritas yang terjadi selama proses produksi radionuklida perlu dianalisis dan diperhatikan supaya dapat memenuhi persyaratan untuk digunakan di dalam kedokteran nuklir. Radionuklida medis berbasis siklotron dapat diproduksi dengan metode iradiasi langsung dan tidak langsung. Metode iradiasi langsung dilakukan dengan menembakkan

secara langsung berkas partikel setelah dipercepat di dalam siklotron. Metode iradiasi tidak langsung melibatkan dua target, yaitu target primer yang akan menghasilkan neutron sekunder setelah diiradiasi dengan berkas proton, dan target sekunder yang akan menghasilkan radioisotop yang diinginkan. Metode iradiasi tak langsung ini masih relatif baru sehingga perlu digali lebih dalam lagi dan di masa depan teknologi ini akan semakin berkembang.

Di Rumah Sakit di Jakarta sudah ada 3 siklotron yang dapat beroperasi untuk produksi radioisotop (Ferdinandus dkk., 2015), meskipun ketiga siklotron tersebut hanya digunakan untuk produksi radionuklida F-18, padahal masih banyak lagi radionuklida lain yang perlu dipelajari dan diproduksi untuk mendukung kemajuan kedokteran nuklir di Indonesia. Keterbatasan fasilitas siklotron dapat mengganggu kemajuan riset teknologi produksi radionuklida medis sehingga dikhawatirkan akan berdampak pada pelayanan kedokteran nuklir Indonesia. Penguasaan teknologi produksi radioisotop medis diharapkan semakin baik dan meningkat mengingat aplikasi radioisotop untuk diagnosis dan terapi berbagai penyakit akan semakin berkembang. Munculnya berbagai penyakit baru seperti covid-19 yang ternyata dapat didiagnosis dengan radioisotop PET dan bahkan komplikasinya pasca seorang pasien terkena covid-19 juga dapat didiagnosis dengan radioisotop F-18. Ini membuktikan bahwa radionuklida medis akan selalu dibutuhkan dimasa depan munculnya berbagai penyakit baru. Peran strategis teknologi produksi radionuklida medis dalam menyelesaikan permasalahan kesehatan nasional menjadi kunci utama dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan RPJMN 2024-2029 menuju visi Indonesia emas 2045.

VII. PENUTUP

Teknologi produksi radionuklida medis telah terbukti mampu mengurangi beban kesehatan masyarakat akibat kanker dan penyakit degeneratif lainnya. Kerjasama yang erat antara Rumah Sakit sebagai pengguna radionuklida medis dan periset dari berbagai disiplin ilmu di berbagai lembaga yang kompeten sebagai penyedia teknologi produksi radionuklida medis akan sangat membantu percepatan pemanfaatan teknologi nuklir dalam kedokteran nuklir (Kambali & Suryanto, 2020). Keterbukaan informasi antara pelaku riset, lembaga perijinan dan kementerian kesehatan akan secara signifikan meningkatkan kemampuan penyedia teknologi dalam membantu memecahkan masalah kesehatan yang dihadapi oleh dunia medis. Radionuklida medis memiliki peran strategis dalam mendukung target Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2024-2029 untuk meningkatkan efektivitas program pencegahan dan pengendalian penyakit tidak menular menuju visi Indonesia Emas 2045. Peran ini mencakup berbagai aspek kesehatan, penelitian, dan pengembangan teknologi, yang sejalan dengan prioritas pembangunan nasional, khususnya di sektor kesehatan dan inovasi teknologi.

Peran strategis radionuklida medis dalam hal peningkatan kualitas pelayanan kesehatan mencakup diagnosis (Kambali, 2019) dan terapi (Kambali & Febrianto, 2022) berbagai penyakit. Dengan mengembangkan kapasitas produksi radionuklida domestik, melalui fasilitas akselerator, layanan berbasis radionuklida dapat diperluas hingga ke daerah terpencil. Selain itu, pengembangan industri berbasis teknologi

tinggi ini akan mendorong peningkatan kemampuan Indonesia dalam memproduksi radionuklida dan akan mengurangi ketergantungan pada impor bahan baku, memperkuat industri farmasi nuklir, dan mendukung kemandirian teknologi. Bahkan investasi dalam riset dan pengembangan teknologi nuklir medis dapat menciptakan ekosistem inovasi yang memperkuat daya saing nasional di sektor teknologi tinggi.

Dengan diagnosa dan pengobatan yang lebih baik, radionuklida medis dapat menurunkan beban penyakit, meningkatkan kualitas hidup masyarakat, memperpanjang harapan hidup dan pada akhirnya meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Pengembangan dan komersialisasi teknologi nuklir medis dapat menciptakan lapangan kerja baru, mendorong pertumbuhan ekonomi berbasis ilmu pengetahuan dan sebagai pilar untuk pembangunan berkelanjutan. Permasalahan yang berkaitan dengan sediaan radioisotop dan radiofarmaka di Indonesia akibat ketergantungan terhadap produk impor yang saat ini menguasai lebih dari 90% pasar radioisotop medis perlu segera diselesaikan, salah satunya dengan peningkatan kapasitas SDM dalam penguasaan teknologi produksi radionuklida medis, dan fasilitas siklotron yang tidak hanya terpusat di Jawa, tetapi harus tersebar di seluruh tanah air karena radionuklida medis mempunyai waktu paruh yang pendek. Semua pemangku kepentingan harus duduk bersama dalam menyelesaikan masalah yang ada. Kedepan, radionuklida medis diharapkan akan digunakan sebagai metode primer dalam deteksi kanker dan penyakit degeneratif lainnya sehingga mampu mengurangi beban kesehatan masyarakat Indonesia secara signifikan (Kambali, 2020).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan rasa syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena dengan rahmat dan izin-Nya, saya dapat mencapai jenjang Peneliti Ahli Utama dan menyelesaikan orasi untuk Pengukuhan Profesor Riset hari ini.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang setinggi-tingginya saya haturkan kepada Presiden Republik Indonesia, Jenderal TNI (Purn) Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia ke-7, Ir. H. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai Peneliti Ahli Utama di BRIN; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Prof. Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc., juga kepada Wakil Kepala Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST, M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga saya sampaikan kepada Majelis Pengukuhan Profesor Riset: Prof. Dr. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE, Ph.D., beserta Sekretaris, Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc.; tim penelaah naskah orasi Prof. Dr. Mukh. Syaifudin, Prof. Ir. Yohannes Sardjono, M.Sc. dan Prof. Dr. Ir. Agus Budhie Wijatna, M.Si., IPM yang telah memberikan saran dan masukan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang terbuka pengukuhan Profesor Riset. Kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala Organisasi Riset Tenaga Nuklir Dr. Syaiful Bakhri; Direktur Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Dr. Eng. Zainal Arief, S.T., M.T., Kepala Pusat Riset Teknologi Akselerator, Prof. Dr. Muhammad Rifai, S.Si., M.Eng., Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si. serta seluruh panitia atas

kesempatan, bantuan, serta kerja sama yang diberikan untuk pelaksanaan acara Pengukuhan Profesor Riset hari ini.

Hormat dan terima kasih saya haturkan juga kepada guru-guru yang telah mengajarkan dan memberikan pendidikan secara tulus dari pendidikan dasar hingga pendidikan tinggi serta di lingkungan kerja. Kepada Prof. Dr. Anhar Riza Antariksawan, Prof. Edy Giri Rachman Putra, Ph.D., Prof. Dr. Rer.nat. Evvy Kartini yang telah banyak mengajarkan saya untuk terus berkomitmen di bidang fisika dan teknik nuklir, khususnya teknologi produksi radioisotop.

Capaian dan keberhasilan yang saya peroleh hari ini tentunya tidak terlepas dari doa-doa tulus yang dipanjatkan dari kedua orang tua, Ibu Amah (almh.) dan Bapak Muntari (alm.) saya tercinta dan saudara-saudara saya karena selalu memberikan semangat, sumber inspirasi, dukungan dan do'anya.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi saya sampaikan kepada rekan-rekan di fasilitas siklotron Serpong, RS Kanker Dharmais dan RS MRCCC Siloam yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu sehingga saya dapat melakukan riset di bidang nuklir.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada keluarga besar Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Pusat Riset Teknologi Akselerator, Ex Pusat Sains Teknologi Akselerator-BATAN dan Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka-BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliyah, F., **Kambali, I.**, Setiawan, A. F., Radzi, Y. M., Rahman, A.A. (2023). Utilization of steel slag from industrial waste for ionizing radiation shielding concrete: A systematic review, *Construction and Building Materials* 328, 131360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131360>
- Aliyah F, Rahman A. A, Radzi Y. M, **Kambali I.** (2023). Combined method of bulk shielding evaluation for 200 MeV high energy neutron source using PHITS modelling and particle density. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 8 (1): 1–16.
<https://doi.org/10.21009/SPEKTRA>.
- Auditore, L., Amato, E., & Baldari, S. (2017). Theoretical estimation of ^{64}Cu production with neutrons emitted during ^{18}F production with a 30 MeV medical cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes*, 122, 229–234.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.02.002>.
- Bonay, A.H.P., Suryanto, H., **Kambali, I.** (2016). Analisis impuritas produksi radionuklida ^{18}F berbasis siklotron eclipse 11 MeV. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016*. Tangerang Selatan, 3 November 2016. 160–166. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/062/50062839.pdf
- Bray, F., Laversanne, M., Sung H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Soerjomataram, I., Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.*, 74:229-263.
<https://doi.org/10.3322/caac.21834>.

- Chen, S., Cao, Z., Prettnner, K., Kuhn, M., Yang, J., Jiao, L., Wang, Z., Li, W., Geldsetzer, P., Bärnighausen, T., Bloom, D.E., Wang, C. (2023). *JAMA Oncol.*, 9(4), 465–472. <https://doi.org/10.1001/jamaoncol.2022.7826>.
- Jones, T., & Townsend, D. (2017). History and future technical innovation in positron emission tomography. *Journal of Medical Imaging*, 4(1), 011013.
<https://doi.org/10.1117/1.jmi.4.1.011013>
- Kambali, I.,** Suryanto, H. (2020). Cancer Imaging Using Positron Emission Tomography/Computed Tomography. *Proceedings of the International Seminar on Intelligent Technology and Its Application (ISITIA 2020) : Humanification of reliable intelligent systems : 22-23 July 2020, virtual conference*.
<https://doi.org/10.1109/ISITIA49792.2020.9163740>
- Kambali, I.** (2018a). Cyclotron-Based Samarium-153 Production Using Alpha Particle Beam Irradiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1120(1), 012010.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012010>
- Kambali, I.** (2014). *Calculated Radioactivity Yields of Cu-64 from Proton-Bombarded Ni-64 Targets Using SRIM Codes Atom Indonesia* 40(3), 129–134.
- Kambali, I.** (2017). Comprehensive Theoretical Studies on 11-MeV Proton Based Tc-99m Production. *Makara Journal of Science*, 21(3), 5. <https://doi.org/10.7454/mss.v21i3.5507>
- Kambali, I.** (2018b). Calculated astatine-211 production yields for radioimmunotherapy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1116(3). 032013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1116/3/032013>
- Kambali, I.** (2018c). Production of Lu-177 Radionuclide using Deuteron Beams: Comparison between (d,n) and (d,p) Nuclear

Reactions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1120(1), 012011.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012011>

Kambali, I. (2019). Proton-produced radionuclides for radiodiagnostic modalities in cancer studies. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1), 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012106>

Kambali, I., Rajiman, Parwanto, Marlina, Kardinah, Nur Huda, Listiawadi, F.,D., Astanina, H., Ismuha, R.R., Heranudin, Suryanto, H. (2020). Spectral Analysis of Proton-Irradiated Natural MoO₃ Target Relevant for Technetium-99m Radionuclide Production. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 52(2), 222–231.

<https://doi.org/10.5614/j>

Kambali, I. (2020). Radioactivity yields of Gallium-67 applicable for scintigraphy of various disease in nuclear medicine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1572(1), 012055.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1572/1/012055>

Kambali, I. (2021a). Cyclotron-based rhenium-186 production using proton beam of up to 50 MeV. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 012085.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012085>

Kambali, I. (2021b). Estimations of fluorine-18 production yields from 13-MeV proton bombardment of enriched water target. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 012080.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012080>

Kambali, I., Dwi Saputra, A., Marlina, M., Febrianto, I. R., Aziz, I., Rahman, W. Y., Kurnianto, K., Tursinah, R., Ritawidya, R., Haryuni, R. D., Parwanto, P., Rajiman, R., Huda, N., & Fajarwati, K. (2025). Development of Target Holder for the First Experiment

on an Alternative Route for ^{64}Cu Radioisotope Production by Secondary Neutron Irradiation of a ^{64}ZnO Target. *Nuclear Science and Engineering*, 199(5), 829–837.

<https://doi.org/10.1080/00295639.2024.2392070>

Kambali, I., & Febrianto, I. R. (2021). Feasibility Study of Copper-64 Radioisotope Production by Secondary Fast Neutron Bombardment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 927(1), 012034.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/927/1/012034>

Kambali, I., Febrianto, I. R., Ritawidya, R., Haryuni, R. D., Marlina, & Nurhuda. (2023). On the study of Cu-64 production from 18 MeV proton-induced secondary fast neutron bombardment. *Journal of the Korean Physical Society*, 82(4), 340–345. <https://doi.org/10.1007/s40042-022-00697-3>

Kambali, I., Heryanto, T., Rajiman, S., & Ichwan, S. (2009). Reliability Analysis of the Liquid Target Chamber for ^{18}F Production at the PRR's Cyclotron Facilities. *Jurnal Radioisotop Dan Radiofarmaka Journal of Radioisotopes and Radiopharmaceuticals*, 2, 5–10.

<https://doi.org/10.17146/aij.2011.69>

Kambali, I. & Suryanto, H. (2014). Optimizing Irradiation Parameter of Cyclotron Produced Radionuclides Cu-64, I-123 and I-124. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Radioisotop Radiofarmaka, Siklotron, dan Kedokteran Nuklir 2014*, 77–85. <https://inis.iaea.org/records/0zt9d-nh451>

Kambali, I., Parwanto, Suryanto, H., Huda, N., Listiawadi, F. D., Astarina, H., Ismuha, R. R., & Kardinah. (2017). Dependence of ^{18}F Production Yield and Radioactive Impurities on Proton Irradiation Dose. *Physics Research International*, 2017, 1–5.

<https://doi.org/10.1155/2017/2124383>

- Kambali, I., & Suryanto, H. (2005).** Measuring the Corrosion Rate of Aluminum by Using Ultra Thin Layer Activation Technique. *Atom Indonesia* 31(1), 35–46.
- Kambali, I., & Suryanto, H. (2016).** Measurement of seawater flow-induced erosion rates for iron surfaces using thin layer activation technique. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(4), 482–494. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.4.9>
- Kambali, I., Suryanto, H., & Parwanto. (2016a).** Identification and angular distribution of residual radionuclides detected on the wall of BATAN's cyclotron cave. *Atom Indonesia*, 42(1), 1–8. <https://doi.org/10.17146/aij.2016.471>
- Kambali, I., Suryanto, H., & Parwanto. (2016b).** Radioactive by-products of a self-shielded cyclotron and the liquid target system for F-18 routine production. *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 39(2), 403–412. <https://doi.org/10.1007/s13246-016-0426-1>
- Kambali, I., Suryanto, H., Parwanto, Kardinah, Huda, N., Listiawadi, F. D., Astarina, H., & Ismuha, R. R. (2019).** Recoiled and sputtered radioactive impurities in 11 MeV proton-based F-18 production. *International Journal of Technology*, 10(2), 300–308. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i2.3060>
- Kambali, I., Suryanto, H., Parwanto, P., Rajiman, R., & Marlina, M. (2016).** Production of F-18 and Tc-99m Radionuclides Using an 11-MeV Proton Accelerating Cyclotron. *Proceedings of Cyclotrons2016, Zurich, Switzerland*. 83-86. <https://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2016/papers/mop13.pdf>
- Kambali, I., Suryanto, H., Rajiman, Parwanto, Rindiyanono, F., Billah, A. A., & Pasha. (2020).** Qualitative analysis of long-lived residual radioisotopes in 18 MeV proton bombarded enriched

water target. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(1), 012021.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012021>

Kambali, I., & Wibowo, F. A. (2019). Comparison of gallium-68 production yields from (p,2n), (α ,2n) and (p,n) nuclear reactions applicable for cancer diagnosis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(2), 022003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022003>

Kambali, I., & Wibowo, F. A. (2023). Optimum radioactivity yield of Zirconium-89 radionuclide applicable for radioimmuno-PET imaging. *Journal of Physics: Conference Series*, 2498(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2498/1/012010>

Kambali, I., Suryanto, H., Setiawan, H., Puspipetek Serpong, K., & Selatan, T. (2014). The Stopping Power and Range of Energetic Proton Beams in Nickel Target Relevant for Copper-64 Production. *Journal of Radioisotopes and Radiopharmaceuticals*, 17(1), 27-34.

<https://inis.iaea.org/records/cvts4-7nv41>

Kambali, I., Febrianto, I. R., Saputra, A. D., Aziz, I., Kartika, B. M., Ritawidya, R., Haryuni, R. D., Marlina, Rahman, W. Y., Rajiman, Parwanto, Nurhuda, & Suryanto, H. (2023). Metode Produksi Radioisotop Tembaga-64 (Cu-64) dengan Menggunakan Neutron Sekunder dan Alat Pemegang Target Padat (Nomor Paten: P00202314813). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/c149afb4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.

Kambali, I., Saputra, A. D., Febrianto, I. R., Suharni, Ichwan, S., Diah, F. I., & Nurhuda (2024). Alat Pemegang target Ganda pada Produksi Radioisotop F-18 dan Cu-64 Secara Simultan Berbasis Siklotron (Nomor Paten: P00202415134). Direktorat Jenderal

Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/c149afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.

Kartika, B. M., **Kambali, I.**, Mulyani, E., Parwanto, Febrianto, I. R., Saputra, A. D., Anggraeni, A., Aziz, I., Suharni, Kozin, M., Suryanto, H. & Nurhuda (2023). Bahan Stripper Foil menggunakan Polikristalin Grafit (Nomor Paten: P00202314783). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/c149afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.

Kemeskes RI, Survey Kesehatan Indonesia 2023. <https://www.badankebijakan.kemkes.go.id/hasil-ski-2023/>

Kim, J. Y., Park, H., Lee, J. C., Kim, K. M., Lee, K. C., Ha, H. J., Choi, T. H., An, G. Il, & Cheon, G. J. (2009). A simple Cu-64 production and its application of Cu-64 ATSM. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(7–8), 1190–1194. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.02.060>

Maiyesni, M., Febriana, S., **Kambali, I.**, & Kurniasih, D. (2019). Spectral comparison of neutron-irradiated natural and enriched ytterbium targets for Lu-177 production. *Atom Indonesia*, 45(3), 133–137.

<https://doi.org/10.17146/aij.2019.930>

Maiyesni, Mujinah, Kurniasih, D., Witarti, Hambali, Febrianti, S., & **Kambali, I.** (2023). A Modified Method for Increasing Radiochemical Purity of I-125 for Radiopharmaceuticals. *Atom Indonesia*, 49(1), 1–5. <https://doi.org/10.55981/aij.2023.1243>

Rezki, M., **Kambali, I.**, Hidayanto, E., & Arianto, F. (2020). Comparison of $^{192}\text{Os}(p, n)^{192}\text{Ir}$ and $^{192}\text{Os}(d, 2n)^{192}\text{Ir}$ nuclear reactions for ^{192}Ir production. *Atom Indonesia*, 46(1), 41–46. <https://doi.org/10.17146/AIJ.2020.955>

Riana, A., **Kambali, I.**, Suryanto, S. (2016). Penentuan energi berkas proton menggunakan metode aktivasi susunan foil tembaga.

- Prosiding *Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016*. Tangerang Selatan, 3 November 2016. 102–107. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/062/50062830.pdf
- Schuh, A., Fritsch, A., Heim, M., Shore, A., & Thoennessen, M. (2010). Discovery of the iron isotopes. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 96(6), 817–823. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2010.06.003>
- Silakhuddin, Kudus I A. (2022). Study of development of the DECY-13 cyclotron based on applied physics learning. *Journal of the Korean Physical Society* 80, 880–886.
- Singh, D., Vignat, J., Lorenzoni, V., Eslahi, M., Ginsburg, O., Lauby-Secretan, B., Arbyn, M., Basu, P., Bray, F., & Vaccarella, S. (2023). Global estimates of incidence and mortality of cervical cancer in 2020: a baseline analysis of the WHO Global Cervical Cancer Elimination Initiative. *The Lancet Global Health*, 11(2), e197–e206. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(22\)00501-0](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00501-0)
- Soenarjo, S., Suryanto, H., Silakhudin, Wisnukaton, K. (1993). Penggunaan Fasilitas Siklotron BATAN untuk Produksi Talium-201. *Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung*, 16-18 Februari 1993, 163–170
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Suryanto, H., & **Kambali, I.** (2018). A novel method for ^{57}Ni and ^{57}Co production using cyclotron-generated secondary neutrons. *Atom Indonesia*, 44(2), 81–87. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.872>
- Tursinah, R., Permana, S., Su'ud, Z., Maulana, A., **Kambali, I.**, Rivai, A. K., Mujamilah, Isnaini, I., Kasmudin, K., Seno, H., Subhiyah, H., Yanto, A. R., Muhaimin, A., Nurhuda, Suryanto, H., & Wahyudi. (2025). Characterization of proton-induced neutron spectrum on Ti-nat target in 11 MeV cyclotron using a passive

single moderator neutron spectrometer. *Radiation Physics and Chemistry*, 227, 112387

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112387>

Wibowo, F. A., & **Kambali, I.** (2019). CalcuYield: A Novel Android-Based Software for Radioactivity Yield Calculations. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022008>

Wibowo, F. A., & **Kambali, I.** (2021). Calculated cyclotron-based scandium-47 production yields via $^{48}\text{Ca}(p, 2n)^{47}\text{Sc}$ nuclear reaction. *Journal of Physics: Conference Series*, 1816(1), 022008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1816/1/012099>

Wibowo, F. A., & **Kambali, I.** (2024). Cerium-139 Radionuclide Production from Proton-Induced Nuclear Reaction on Lanthanum-139 Target for Diagnostic Applications. *AIP Conference Proceedings*, 2967(1), 21009. <https://doi.org/10.1063/5.0192862>

Xie, Q., Zhu, H., Wang, F., Meng, X., Ren, Q., Xia, C., & Yang, Z. (2017). Establishing reliable Cu-64 production process: From target plating to molecular specific tumor micro-PET imaging. *Molecules*, 22(4), 641.

<https://doi.org/10.3390/molecules22040641>

Yamaguchi, Y., Watanabe, G., Fukuda, Y., Ageishi, T., Katayama, T., Ogawa, T., & Uozumi, Y. (2020). Development of INC-ELF version 2 and incorporation into PHITS: Extension to lower incident energies down to 30 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 479, 233–239.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.07.012>

Zanzonico, P. (2017). Instrumentation for single-photon emission imaging. In *Nuclear Oncology: From Pathophysiology to Clinical Applications* (pp. 251–273). Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-26236-9_5

Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., & Biersack, J. P. (2010). SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11–12), 1818–1823.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Bagian Buku Nasional

1. Awaludin R, **Kambali I**, Mulyani E, Widodo S. (2018). Aplikasi Siklotron untuk Produksi Radionuklida Medik. Dalam: Anggraita P, Sunarjo S, Yustiasuti, Darsono, Editor. Siklotron Medik, Teknologi, Operasi dan Perawatannya. Yogyakarta: Penerbit Bintang Pusata Utama; ISBN 978-602-1546-92-5

Jurnal Internasional

2. Suharni, Prabaningrum N., **Kambali I**. (2025) The PHITS simulation study for an alternative production of ^{32}P radioisotope by secondary neutron bombardment of ^{32}S target. Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering 87(2): 263–268.
3. Tursinah R., Permana S., Su'ud Z., Maulana A., **Kambali, I.**, Rivai A. K., Mujamilah, Isnaini I., Kasmudin K., Seno H., Subhiyah H., Yanto A. R., Muhaimin A., Nurhuda, Suryanto H., Wahyudi. (2025). Characterization of proton-induced neutron spectrum on Ti-nat target in 11 MeV cyclotron using a passive single moderator neutron spectrometer. Radiation Physics and Chemistry 227: 112387.
4. **Kambali I.**, Dwi Saputra A., Marlina M., Febrianto I. R., Aziz I., Rahman W. Y., Kurnianto K., Tursinah R., Ritawidya R., Haryuni R. D., Parwanto P., Rajiman R., Huda N., Fajarwati K. (2025). Development of Target Holder for the First Experiment on an Alternative Route for ^{64}Cu Radioisotope Production by Secondary Neutron Irradiation of a ^{64}ZnO Target. Nuclear Science and Engineering 199(5), 829–837.

5. Aliyah F., **Kambali I.**, Setiawan A. F., Radzi Y. M., Rahman A. A. (2023). Utilization of steel slag from industrial waste for ionizing radiation shielding concrete: A systematic review, *Construction and Building Materials* 328:131360.
6. Aliyah F., Rahman A. A., Radzi Y. M., **Kambali I.** (2023). Combined method of bulk shielding evaluation for 200 MeV high energy neutron source using PHITS modelling and particle density. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 8 (1): 1–16.
7. **Kambali I.**, Febrianto I. R., Ritawidya R., Haryuni R. D., Marlina, Nurhuda. (2023). On the Study of Cu-64 Production from 18 MeV Proton-Induced Secondary Fast Neutron Bombardmen, *Journal of the Korean Physical Society* 82(4): 340–345.
8. Walimenu E. U. K., Malau V., Iswanto P. T., **Kambali I.**, Suprpto, Sutjitno T. (2021). Corrosion Fatigue Crack Propagation of AISI 316L by Nitrogen Ion Implantation in Simulated Body Fluid, *Metalurgija* 6: 43–46.
9. Rezki M., **Kambali I.**, Hidayanto E., Arianto F. (2020). Comparison of $^{192}\text{Os}(p,n)^{192}\text{Ir}$ and $^{192}\text{Os}(d,2n)^{192}\text{Ir}$ Nuclear Reactions for ^{192}Ir Production, *Atom Indonesia* 46 (1): 41–46.
10. **Kambali I.**, Nurhuda, Listiawadi F. D., Astarina H., Ismuha R. R., Suryanto H. (2020). Spectral Analysis of Proton-Irradiated Natural MoO_3 Relevant for Technetium-99m Radionuclide Production, *Journal of Mathematical & Fundamental Sciences* 52 (2), 2020, 222–231.
11. **Kambali I.**, Suryanto H., Parwanto, Kardinah, Nurhuda, Listiawadi F. D., Astarina H., Ismuha R. R. (2019). Recoiled and Sputtered Radioactive Impurities in 11 MeV Proton-Based F-18 Production. *International Journal of Technology* 10(2): 300–308.
12. Maiyesni, Febriana S., **Kambali I.**, Kurniasih D. (2019). Spectral Comparison of Neutron-Irradiated Natural and Enriched Ytterbium Targets for Lu-177 Production. *Atom Indonesia* 45: 133–137.

13. Suryanto H., **Kambali I.** (2018). A Novel Method for ^{57}Ni and ^{57}Co Production using Cyclotron-Generated Secondary Neutrons. *Atom Indonesia* 44 (2); 81–87.
14. **Kambali I.**, Parwanto, Suryanto H., Nurhuda, Listiawadi F. D., Astarina H., Ismuha R. R., Kardinah. (2017). Dependence of ^{18}F Production Yield and Radioactive Impurities on Proton Irradiation Dose. *Physics Research International* 2017: 1–5.
15. **Kambali I.**, Suryanto H. (2016). Thin Layer Activation Technique for Measurement of Flow-Induced Corrosion Rates of Iron Surfaces”, *Journal of Engineering and Technological Sciences* 48: 491–503.
16. **Kambali I.**, Suryanto H., Parwanto. (2016). Radioactive By-Products of A Self-Shielded Cyclotron and the Liquid Target System for F-18 Routine Production. *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine* 39: 1–10.
17. **Kambali I.**, Suryanto H., Parwanto. (2015). Identification and Angular Distribution of Residual Radionuclides Detected on the Wall of the BATAN’s Cyclotron Cave. *Atom Indonesia* 40(3): 129–134.
18. **Kambali I.** (2014). Calculated Radioactivity Yields of Cu-64 from Proton-Bombarded Ni-64 Targets Using SRIM Codes. *Atom Indonesia* 40(3): 129–134.
19. **Kambali I.**, O’Sullivan G. (2014). Spectroscopic Studies of Soft X-Ray Emission from Gadolinium Plasmas. *Atom Indonesia* 40(2): 57–61.
20. **Kambali I.**, Scally E., Dunne P., O’Sullivan G., Sheridan P., Sokell E., O’Reilly F. (2013). A tin–gold alloy based EUV source for metrology applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46: 495104.

21. **Kambali I.**, Heryanto T., Rajiman, Ichwan S. (2011) Reliability Study of the Liquid Target Chamber for ^{18}F Production at the BATAN's Cyclotron Facilities. *Atom Indonesia* 37(1): 5–10.
22. Gladys M. J., **Kambali I.**, Karolewski M., Soon A., Stampfl C., O'Connor D. J. (2010). Comparison of Hydrogen and Deuterium Adsorption on Pd(100). *The Journal of Chemical Physics* 132: 024714-1 – 024714-8.
23. **Kambali I.**, Gladys M. J., Karolewski M. A., O'Connor D. J. (2008). Determination of Hydrogen Adsorption Site on Pd(100) using Low Energy Recoil Spectroscopy. *Applied surface science* 254(14): 4245–4250.

Jurnal Nasional

24. **Kambali I.** (2019). Calculated Radioactivity Yields of Gallium-67 using Matlab Codes. 2019. *Jurnal Sains Materi Indonesia* 21(1): 21–26
25. **Kambali I.**, Saptiama I., Suryanto H. (2017). Residual Radioisotopes Generated from Neutron Irradiated Aluminum Capsules. *Aceh International Journal of Science and Technology* 6 (3): 104–110
26. **Kambali I.** (2017). Comprehensive Theoretical Studies on 11-MeV Proton Based Tc-99m Production *Makara Journal of Science* 21(3): 125–130
27. **Kambali I.**, Suryanto H., Setiawan H. (2014). The Stopping and Range of Energetic Proton Beams in Nickel Target Relevant for Copper-64 Production, *Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka* 17(1): 27–34
28. **Kambali I.**, Suryanto H., Parwanto. (2005). Measuring the Corrosion Rate of Aluminium by Using Ultra Thin Layer Activation. *Atom Indonesia* 31(1): 35–46

29. **Kambali I.**, Suryanto H. (2014). Interaksi Proton Berenergi Tinggi dengan Materi dan Aplikasinya untuk Studi Korosi Bahan, *Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka* 7(2): 1–13
30. **Kambali I.**, Sujitno T., Kusnanto. (2003). Efek Implantasi Yttrium dan Cerium terhadap Sifat Ketahanan Oksidasi Material FeNiCr Selama Siklus Termal. *Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka* 6(1): 29–40

Prosiding Internasional

31. Wibowo F. A., **Kambali I.** (2024). Cerium-139 radionuclide production from proton-induced nuclear reaction on Lanthanum-139 target for diagnostic applications, AIP Conference Proceedings 2967, 210009 <https://doi.org/10.1063/5.0192862>
32. Pudjorahardjo D. S., **Kambali I.**, Sujitno T., Suprpto S., Andriyanti W., Febriatnto I. R., Saputra A. D., Kartika B. M., Harumningtyas A. A. (2024). Preliminary Study on Tandem Electrostatic Accelerator for The Ion Accelerator Facility at The Research Center for Accelerator Technology, ORTN BRIN, AIP Conference Proceedings 2967, 060006 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0192889>
33. **Kambali I.**, Wibowo F. A. (2023). Optimum radioactivity yield of Zirconium-89 radionuclide applicable for radioimmuno-PET imaging, *Journal of Physics: Conference Series* 2498(1), 012010 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2498/1/012010>
34. **Kambali I.**, Febrianto I. R. (2022). Feasibility study of Samarium-153 production by secondary fast neutron bombardment, AIP Conference Proceedings 2542 (1), 050009. <https://doi.org/10.1063/5.0104756>
35. **Kambali I.**, Febrianto I. R. (2021). Feasibility study of copper-64 radioisotope production by secondary neutron fast bombardment, IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science 927(1), 012034
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/927/1/012034>

36. **Kambali I.** (2021). Feasibility study of Cs-137 nuclear waste transmutation by 13-MeV proton bombardment, AIP Conference Proceedings 2381(1), 020026
<https://doi.org/10.1063/5.0066281>
37. **Kambali I.** (2021). Cyclotron-based rhenium-186 production using proton beam of up to 50 MeV, Journal of Physics: Conference Series 1825 (1), 012085
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012085>
38. **Kambali I.** (2021) Estimations of fluorine-18 production yields from 13-MeV proton bombardment of enriched water target, Journal of Physics: Conference Series 1825 (1), 012080
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012080>
39. Wibowo F. A., **Kambali I.** (2021) Calculated cyclotron-based scandium-47 production yields via $^{48}\text{Ca}(p,2n)^{47}\text{Sc}$ nuclear reaction, Journal of Physics: Conference Series 1816 (1), 012099
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1816/1/012099>
40. **Kambali I.**, Suryanto H. (2020). Cancer Imaging Using Positron Emission Tomography/Computed Tomography. International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) 2020, 2020170-174
<https://doi.org/10.1109/ISITIA49792.2020.9163740>
41. **Kambali I.** (2020). Comprehensive theoretical studies on stable and radioactive isotopes produced by proton irradiation of titanium target, Journal of Physics: Conference Series 1572 (1), 012013
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1572/1/012013>
42. **Kambali I.** (2020) Radioactivity yields of Gallium-67 applicable for scintigraphy of various diseases in nuclear medicine, Journal of Physics: Conference Series 1572 (1), 012055.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1572/1/012055>

43. **Kambali I.** (2020). Suryanto H, Rajiman, Parwanto, Rindiyantono F, Billah A, Pasha, Qualitative Analysis of Long-Lived Residual Radioisotopes in 18 MeV Proton Bombarded Enriched Water Target, Journal of Physics: Conference Series 1436, 012022 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012021>
44. **Kambali I.** (2020). Transmutation of ^{129}I Containing Nuclear Waste by Proton Bombardment, Journal of Physics: Conference Series 1436, 012022 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012022>
45. **Kambali I.** (2020). Theoretical study on the production of stable and radioactive isotopes from proton irradiated sodium chloride, Journal of Physics: Conference Series 1442, 012022 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1442/1/012022>
46. **Kambali I., Wibowo F. A.** (2019) Comparison of gallium-68 production yields from (p,2n), (α ,2n) and (p,n) nuclear reactions applicable for cancer diagnosis, Journal of Physics: Conference Series 1198, 022003 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022003>
47. Wibowo F. A., **Kambali I.** (2019) CalcuYield: A Novel Android-Based Software for Radioactivity Yield Calculations, Journal of Physics: Conference Series 1198, 022008 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022008>
48. **Kambali I.** (2019). Proton-produced radionuclides for radiodiagnostic modalities in cancer studies, Journal of Physics: Conference Series 1153, 01210 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012106>
49. **Kambali I.** (2018). Cyclotron-Based Samarium-153 Production using Alpha Particle beam, Journal of Physics: Conference Series 1120(1), 012010 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012010>
50. **Kambali I.** (2018). Production of Lu-177 Radionuclide using Deuteron Beams: Comparison between (d, n) and (d, p) Nuclear

Reactions, Journal of Physics: Conference Series 1120 (1), 012011
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012011>

51. **Kambali I.** (2018). Calculated astatine-211 production yields for radioimmunotherapy, Journal of Physics: Conference Series 1116 (3), 032013
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1116/3/032013>
52. **Kambali I.**, Suryanto H., Parwanto, Rajiman, Marlina. (2016). Production of F-18 and Tc-99m Radionuclides using an 11 MeV Proton Accelerating Cyclotron, proc. cyclo. 2016, 83-86
<https://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2016/papers/mop13.pdf>
53. **Kambali I.**, McCormack T., Scally E., White J., O'Reilly F., Sheridan P., O'Sullivan G. (2011). Understanding the behavior of laser-produced tin plasma by time-resolved spectroscopy and simulations of their spectra, Proceedings of SPIE 2011, 7969
<https://doi.org/10.1117/12.878869>
54. McCormack T., Scally E., **Kambali I.** (2010). Time-Resolved Studies of Laser Produced Plasmas of Tin, Proceedings of SPIE 2010, 763637
<https://doi.org/10.1117/12.848341>

Prosiding Nasional

55. Rajiman, **Kambali I.**, Lindawati. (2017). Pembuatan Pemegang Target Padat untuk Produksi Radionuklida Tc-99m berbasis Siklotron, Prosiding Seminar Pendayagunaan Teknologi Nuklir 2017, 110 – 114
<https://inis.iaea.org/records/sdr4f-4n764>
56. Bonay A. H. P., Suryanto H., **Kambali I.** (2016). Analisis Impuritas Produksi Radionuklida F-18 berbasis Siklotron Eclipse 11 MeV, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016 Pusat Teknologi Radioisotop dan radiofarmaka, 160 – 166 (2016). <https://inis.iaea.org/records/rpnbh-e5593>

57. Riana A., **Kambali I.**, Suryanto H. (2016). Penentuan Energi Proton Menggunakan Metode Aktivasi Susunan Foil Tembaga, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016 Pusat Teknologi Radioisotop dan radiofarmaka, 102 – 107 https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50062830
58. Listiawadi F. D., Suryanto H., Parwanto, **Kambali I.**, Astarina H., Ismuha R. R., Nurhuda. (2015). Evaluasi Hasil Produksi Radionuklida F-18 dari Target Air Diperkaya O-18 Menggunakan Siklotron Eclipse 11 MeV di Rumah Sakit Kanker Dharmais, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 17, 43 – 49 <https://inis.iaea.org/records/4g2jy-bax35>
59. **Kambali I.**, Suryanto H. (2014) Optimizing Irradiation Parameters of Cyclotron Produced Radionuclides Cu-64, I-123 and I-124, Prosiding Pertemuan Ilmiah Radioisotop, Radiofarmaka, Siklotron dan Kedokteran Nuklir 2014, 77 – 85. <https://inis.iaea.org/records/0zt9d-nh451>
60. **Kambali I.**, Suryanto H., Sarwono D. A., Amiruddin C. (2014). On the Study of Proton Irradiated Tellurium Targets Relevant for Production of Medical Radioisotope Iodine-123 and Iodine-124, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu dan Teknologi Nuklir 2014, 78 – 83. <https://inis.iaea.org/records/0c1at-fwm06>
61. **Kambali I.** (2008) Penentuan Letak dan Posisi Adsorpsi Hidrogen pada Palladium(110) dengan Spektroskopi Hamburan Ion Energi Rendah, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 2008, 17 – 25 <https://adoc.pub/penentuan-letak-dan-posisi-adsorpsi-hidrogen-pada-permukaan-.html>

PATEN

62. **Kambali, I.**, Febrianto, I. R., Saputra, A. D., Aziz, I., Kartika, B. M., Ritawidya, R., Haryuni, R. D., Marlina, Rahman, W. Y., Rajiman, Parwanto, Nurhuda, & Suryanto, H. (2023). Metode Produksi Radioisotop Tembaga-64 (Cu-64) dengan Menggunakan Neutron Sekunder dan Alat Pemegang Target Padat (Nomor Paten: P00202314813). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.
63. Kartika, B. M., **Kambali, I.**, Mulyani, E., Parwanto, Febrianto, I. R., Saputra, A. D., Anggraeni, A., Aziz, I., Suharni, Kozin, M., Suryanto, H. & Nurhuda (2023). Bahan Stripper Foil menggunakan Polikristalin Grafit (Nomor Paten: P00202314783). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.
64. **Kambali, I.**, Saputra, A. D., Febrianto, I. R., Suharni, Ichwan, S., Diah, F. I., & Nurhuda (2024). Alat Pemegang target Ganda pada Produksi Radioisotop F-18 dan Cu-64 Secara Simultan Berbasis Siklotron (Nomor Paten: P00202415134). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual. <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/detail/afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855>.

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

65. Munir M, Widyaningrum T, **Kambali I**, Buku Hasil Litbang PTRR, Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka, 1-89 (2017)
66. Sulisworo P, Sugiyarto, Andani IWS, Yulianto YE, Bunawas **Kambali I**, Tjahyani DTS, Suwoto, Ariyanto S, Yulianto T, Nugroho DH, Sumarbagono, Mulyono T, Widayat S, Heryati U, Purnomo AB, Darma P, Standar BATAN 018-BATAN: 2015 tentang Kosakata Energi Nuklir, Penerbit Badan tenaga Nuklir Nasional 2015, 1-202 (2015)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama	:	Dr. Imam Kambali
Tempat, tanggal lahir	:	Mojokerto, 5 Mei 1980
Anak ke-	:	8 dari 9 bersaudara
Jenis Kelamin	:	Laki-laki
Nama Ayah Kandung	:	Muntari (Almarhum)
Nama Ibu Kandung	:	Amah (Almarhumah)
Nama Instansi	:	Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Judul Orasi	:	Prospektif Teknologi Produksi Radionuklida Medis Berbasis Siklotron Menuju Visi Indonesia Emas 2045
Ilmu	:	Fisika
Bidang	:	Fisika Nuklir
Kepakaran	:	Teknologi Produksi Radioisotop
No. SK Pangkat Terakhir	:	Keputusan Kepala BRIN Nomor 3433/I/KP/2023 tanggal 30 Maret 2023
No. SK Peneliti Ahli Utama	:	Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 tanggal 9 Januari 2023

B. Pendidikan Formal

No	Jenjang	Nama Sekolah/PT	Kota/Negara	Tahun Lulus
1	SD	SDN Sumbertebu II	Mojokerto	1992
2	SMP	SMPN 1 Bangsal	Mojokerto	1995
3	SMA	SMUN 1 Mojosari	Mojokerto	1998
4	S1	UGM	Yogyakarta	2002
5	S2	The University of Newcastle	Australia	2008
6	S3	University College Dublin, National University of Ireland	Irlandia	2014

C. Pendidikan Nonformal

No	Nama Pelatihan/Pendidikan	Kota/Negara	Tahun
1	Joint ICTP/IAEA Workshop on Advance Computer Simulation for Ion Beam Analysis	ICTP, Italia	2009
2	Joint ICTP/IAEA Advanced school on X-ray and gamma ray spectrometry	ICTP, Italia	2009
3	Training program on Cyclotron Operation, Maintenance, and Application for Medical Radionuclide Production	Saudi Arabia	2016

4	Joint ICTP-IAEA Workshop on the Evaluation of Nuclear Reaction Data for Applications	ICTP, Italia	2017
5	Ion Beam Application Training Sessions: Accelerator Principles, Cyclotron Overview, Vacuum System Theory, RF Theory, Applications, GMP, Synthesis Module	IBA, Belgia	2017
6	Practical Training on Cyclotron Technology and Application to Support Nuclear Medicine in Indonesia	SKKU, Korea Selatan	2019

D. Jabatan Struktural

No	Jabatan	Instansi	Tahun
1	Kepala Bidang Teknologi Radioisotop	BATAN	2018-2019
2	Kepala Bidang Fisika Partikel	BATAN	2019-2020

E. Jabatan Fungsional

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Pertama III/a	1 Juni 2005
2	Peneliti Ahli Muda III/c	1 Oktober 2009
3	Peneliti Ahli Madya IV/a	28 Februari 2017
4	Peneliti Ahli Utama	9 Januari 2023

F. Penugasan Khusus

No	Penugasan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Program S-2 di The University of Newcastle, Australia	BATAN	2006-2008
2	Program S-3 di National University of Ireland	BATAN	2009-2014

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota/Negara)	Tahun
1	Seminar Pengembangan Teknologi Reaktor Maju	Peserta	BATAN, Serpong	2003
2	Seminar Teknologi Plasma Nitridasi	Peserta	BATAN, Serpong	2004
3	Seminar dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Iptek Nuklir	Pemakalah	BATAN, Yogyakarta	2004
4	Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator	Pemakalah	BATAN, Yogyakarta	2004

5	Seminar Nasional Himpunan Fisika Indonesia Cabang Jogjakarta	Pemakalah	UST, Yogyakarta	2005
6	Conference on Nuclear Complementary Techniques of Analysis	Pemakalah	University of Melbourne, Australia	2007
7	Seminar on Accelerator Technology and Its Applications	Pemakalah	BATAN, Yogyakarta	2008
8	European Conference for Plasma Physics	Pemakalah	Dublin Institute of Technology, Irlandia	2010
9	Intel European Research Innovation Conference	Pemakalah	Intel, Irlandia	2010
10	SPIE Advanced Lithography Conference	Pemakalah	SPIE, California, USA	2011
11	Photonic Ireland Conference	Pemakalah	Ireland Photonics Society, Irlandia	2011
12	Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Iptek Nuklir	Pemakalah	BATAN, Yogyakarta	2014

13	Pertemuan Ilmiah Tahunan 2014: Radioisotop, Radiofarmaka, Siklotron dan Kedokteran Nuklir	Pemakalah	BATAN-PKNI-PKBNI, Semarang	2014
14	The 2015 Indonesian-American Kavli Frontiers of Science Symposium	Pemakalah	American Kavli Institute, Makassar	2015
15	The 21st International Conference on Cyclotrons and their applications	Pemakalah	Zurich Technical University, Swiss	2016
16	ICOPIA (International Conference on Physics and Its Application)	Pemakalah	UNS, Surakarta	2018
17	International Conference on Theoretical and Applied Physics	Pemakalah	HFI, Medan	2018

18	Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty (SENTEN) 2018	Pemakalah	BATAN, Palembang	2018
19	International Conference on Science and Technology	Pemakalah	USU, Medan	2019
20	The 9 th International Conference on Theoretical and Applied Physics (ICTAP) 2019	Pemakalah	Universitas Lampung, Lampung	2019
21	International Conference on Nuclear Capacity building, Education, Research and Application,	Pembicara	BATAN, Yogyakarta	2019
22	International Conference on Nuclear Capacity building, Education, Research and Application,	Pemakalah	BATAN, Yogyakarta	2019

23	The International Conference on Science and Technology (ICST) 2019	Pemakalah	Universitas Bengkulu, Bengkulu	2019
24	International Conference on Physics and Its Application (ICOPIA)	Pemakalah	UNS, Surakarta	2020
25	The 2020 International Conference on Nuclear Science and Applications (ICONSTA)	Pemakalah	BATAN, Serpong	2020
26	The 6th International Energy Conference ASTECHNOVA and the 3rd Engineering Physics International Conference EPIC	Pemakalah	UGM, Yogyakarta	2020

27	The 4th International Conference on Science and Science Education (ICONSEE) 2021	Pemakalah	UKSW, Salatiga	2021
28	International Conference on Physics and Its Application (ICOPIA)	Pemakalah	UNS, Surakarta	2022
29	The 2022 International Conference on Nuclear Science and Applications (ICONSTA)	Pemakalah	BRIN, Serpong	2022

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1	Atom Indonesia	BATAN Press	Mitra Bestari	2014-sekarang
2	Atom Indonesia	BATAN Press	Editor	2015-sekarang
3	Widyariset	LIPI Press	Mitra Bestari	2016

4	Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa mega	PTKRN BATAN	Mitra Bestari	2019
5	Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir	PSTNT BATAN	Mitra Bestari	2019
6	Jurnal Sains Materi	PSTBM BATAN	Mitra Bestari	2020
7	The Journal of Pure and Applied Chemistry	Universitas Brawijaya	Mitra Bestari	2020
8	Chinese Physics C	IOP Science	Mitra Bestari	2022
9	Scientific Reports	Nature Publishing Group	Mitra Bestari	2022
10	Scientific Reports	Nature Publishing Group	Mitra Bestari	2023
11	Scientific Reports	Nature Publishing Group	Mitra Bestari	2024

I. Karya Tulis ilmiah dan Kekayaan Intelektual

Karya Tulis Ilmiah

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	15
2	Penulis bersama penulis lainnya	46
Total		61

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Indonesia	7
2	Bahasa Inggris	54
Total		61

Kekayaan Intelektual

No	Kualifikasi	Jumlah
1	Paten	3
Total		3

J. Pembinaan Kader Ilmiah Pejabat Fungsional Peneliti

No	Nama	Instansi	Peran/ Tugas	Tahun
1	Mayesni	BATAN	Pembimbing	2018

Mahasiswa

No	Nama	PT/ Universitas	Peran/ Tugas	Tahun
1	Fyndi Abdi Wibowo	STTN	Pembimbing D4	2017

2	Ribkah tabuni	UGM	Pembimbing S1	2017
3	Ade Riana	UIN Sunan Gunung Djati	Pembimbing S1	2017
4	Muhammad Rezki	UNDIP	Pembimbing S1	2019
5	Erich Umbu Kondi Walimenu	UGM	Pembimbing S3	2019
6	Fitrotun Aliyah	Universiti Sains Malaysia	Pembimbing S3	2021
7	Suharni	UGM	Pembimbing S2	2022

K. Organisasi Profesi

No	Jabatan	Nama organisasi	Tahun
1	Anggota	International Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE) – USA	2010-2013
2	Anggota	Institute of Physics UK and Ireland	2010-2013
3	Anggota	Physical Society of Indonesia	2018-2020
4	Anggota	Himpenindo/Perhimpunan Periset Indonesia	2018-sekarang

L. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2015
2	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2023

Teknologi produksi radionuklida medis berbasis siklotron sangat diperlukan dalam mendukung ketahanan kedokteran nuklir Indonesia menuju visi Indonesia Emas 2045. Teknologi nuklir ini meliputi teknologi pemilihan dan penentuan geometri target dan sistem target, metode produksi, radioaktivitas hasil iradiasi dan impuritas radioaktif yang dihasilkan selama proses produksi. Berbagai jenis radionuklida dapat dimanfaatkan dalam kedokteran nuklir, baik untuk diagnosis maupun terapi dapat diproduksi dengan berkas proton yang dihasilkan dari siklotron dengan energi 10-30 MeV, meskipun ada yang memerlukan partikel lain seperti deuteron dan alfa untuk memproduksinya dengan metode iradiasi langsung. Metode iradiasi tidak langsung melibatkan dua target, yaitu target primer yang akan menghasilkan neutron sekunder setelah diiradiasi dengan berkas proton, dan target sekunder yang akan menghasilkan radioisotop yang diinginkan. Metode iradiasi tak langsung ini masih relatif baru sehingga perlu digali lebih dalam lagi dan di masa depan teknologi ini akan semakin berkembang. Penguasaan teknologi produksi radioisotop medis diharapkan semakin baik dan meningkat mengingat aplikasi radioisotop untuk diagnosis dan terapi berbagai penyakit akan semakin berkembang. Munculnya berbagai penyakit baru seperti covid-19 yang ternyata dapat didiagnosis dengan radioisotop PET dan bahkan komplikasinya pasca seorang pasien terkena covid-19 juga dapat didiagnosis dengan radioisotop F-18. Ini membuktikan bahwa radionuklida medis akan selalu dibutuhkan dimasa depan dengan kemunculan berbagai penyakit baru.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.2093



ISSN 3090-8485



9

773090

848005