

Perbandingan Produksi ^{99m}Tc Berbasis Reaktor Nuklir dan Siklotron: Kajian Literatur Terhadap Metode dan Efisiensi

Diastuty Fajar Utami¹, Raditya Faradina²

^{1,2} Program Studi Fisika, Universitas Pertahanan, Bogor, Indonesia

¹fajardiastuty@gmail.com

Abstrak

Teknesium-99m (^{99m}Tc) merupakan radioisotop yang paling banyak digunakan dalam pencitraan medis karena karakteristiknya yang ideal, seperti waktu paruh pendek (6 jam) dan emisi gamma yang sesuai untuk deteksi dengan kamera gamma. Saat ini, ^{99m}Tc diproduksi secara konvensional melalui peluruhan Molibdenum-99 (^{99}Mo) yang diperoleh dari reaktor nuklir. Namun, tantangan dalam pasokan ^{99}Mo , masalah limbah radioaktif, serta kekhawatiran terkait proliferasi nuklir mendorong penelitian alternatif produksi ^{99m}Tc menggunakan siklotron melalui reaksi nuklir langsung. Studi ini membandingkan kedua metode berdasarkan efisiensi produksi, risiko proliferasi, biaya, dan dampak lingkungan melalui *literature review*. Hasilnya menunjukkan bahwa produksi berbasis reaktor lebih efisien tetapi memiliki isu limbah, sementara siklotron lebih ramah lingkungan namun masih memiliki tantangan teknis. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun produksi ^{99m}Tc melalui reaktor masih menjadi metode utama secara global, pengembangan teknologi siklotron menjadi solusi potensial yang dapat meningkatkan keberlanjutan pasokan ^{99m}Tc di masa depan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi ^{99m}Tc menggunakan siklotron agar dapat menjadi alternatif yang lebih kompetitif.

Kata Kunci: Produksi ^{99m}Tc , reaktor, siklotron, perbandingan

PENDAHULUAN

Teknesium-99m (^{99m}Tc) merupakan salah satu radiofarmaka buatan yang paling umum digunakan dalam dunia kedokteran nuklir, khususnya untuk keperluan diagnostik. Popularitasnya dalam pencitraan medis disebabkan oleh karakteristik fisiknya yang sangat mendukung, yaitu memiliki waktu paruh yang relatif pendek sekitar 6 jam, sehingga dapat mengurangi paparan radiasi pada pasien setelah prosedur selesai. Selain itu, energi foton yang dihasilkannya sebesar 140 keV berada dalam rentang yang ideal untuk pencitraan menggunakan kamera gamma, sehingga menghasilkan gambar dengan resolusi yang baik tanpa memberikan dosis radiasi yang terlalu tinggi (Schaffer et al., 2015).

Sejak pertama kali diperkenalkan dalam dunia medis, ^{99m}Tc telah menjadi radioisotop yang paling banyak digunakan, dengan kontribusi mencapai sekitar 85% dari seluruh prosedur kedokteran nuklir yang dilakukan di seluruh dunia. Keunggulan utama ^{99m}Tc dibandingkan radioisotop lain terletak pada kemampuannya menghasilkan citra diagnostik yang berkualitas tinggi dengan dampak biologis yang minimal (Johnstone et al., 2023).

Saat ini, terdapat dua metode utama dalam produksi ^{99m}Tc , yaitu melalui reaktor nuklir dan siklotron. Metode berbasis reaktor nuklir menghasilkan Molibdenum-99 (^{99}Mo) sebagai produk fisi Uranium-235 (^{235}U), yang kemudian meluruh menjadi ^{99m}Tc dalam generator radioisotop. Pada penelitian terdahulu seperti yang dilakukan oleh (Pillai et al., 2013), menunjukkan bahwa metode ini telah menjadi standar utama dalam produksi ^{99m}Tc karena kapasitas produksinya yang besar dan kemampuan dalam mendukung pasokan global.

Sebagai alternatif, produksi ^{99m}Tc melalui siklotron memanfaatkan reaksi nuklir langsung. Di mana proton berenergi tinggi ditembakkan ke target Molibdenum-100 (^{100}Mo) untuk menghasilkan ^{99m}Tc melalui reaksi (p, n). Dalam beberapa studi seperti yang dilakukan oleh (Schaffer et al., 2015) mengungkapkan bahwa penggunaan *High Enriched Uranium* (HEU) dalam produksi ^{99}Mo dapat menimbulkan kekhawatiran terkait proliferasi nuklir dan pengelolaan limbah radioaktif. Sehingga peneliti mendorong berbagai upaya konversi ke *Low Enriched Uranium* (LEU) untuk meningkatkan keamanan dan keberlanjutan pasokan.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan metode dan efisiensi produksi ^{99m}Tc berbasis reaktor nuklir dan siklotron berdasarkan kajian literatur terkini. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan aspek kapasitas produksi, efisiensi proses, dampak lingkungan, keamanan nuklir, serta dari segi ekonomi. Dengan memahami kelebihan dan keterbatasan masing-masing metode, kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai strategi terbaik dalam menjamin ketersediaan ^{99m}Tc secara berkelanjutan di masa depan.

METODE

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *literature review*, yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengumpulkan, serta mengevaluasi berbagai hasil penelitian dan pemikiran yang telah dikembangkan oleh para ilmuwan serta praktisi di bidang fisika medis dan teknologi nuklir. Studi ini berfokus pada analisis mendalam terkait perbandingan metode produksi radioisotop Teknesium-99m (^{99m}Tc) berbasis reaktor nuklir dan siklotron, dengan mempertimbangkan metode, efisiensi produksi, potensi keamanan hasil produksi sehingga dapat digunakan dalam dunia medis, khususnya dalam bidang pencitraan kedokteran nuklir.

Untuk memperoleh sumber informasi yang valid dan relevan, penelitian ini menggunakan berbagai jurnal ilmiah yang diperoleh dari situs daring terpercaya. Literatur yang dikumpulkan mencakup publikasi ilmiah dalam satu dekade terakhir yang berkaitan dengan teknologi produksi ^{99m}Tc menggunakan siklotron, termasuk aspek teknis, keunggulan, keterbatasan, serta implikasi penggunaannya dalam layanan kesehatan.

Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci spesifik dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia, seperti “produksi ^{99m}Tc dengan reaktor”, “produksi ^{99m}Tc dengan siklotron”, serta istilah lain yang relevan. Sebanyak 12 referensi literatur yang relevan telah digunakan dalam penelitian ini. Jumlah dan ragam referensi tersebut memberikan landasan yang kuat dan memperkaya analisis serta meningkatkan validitas dan kedalaman pembahasan terhadap isu-isu penting dalam produksi ^{99m}Tc . Dengan pendekatan ini, penelitian ini berupaya menyajikan analisis yang komprehensif dan terkini, guna memberikan wawasan yang lebih luas mengenai arah pengembangan produksi ^{99m}Tc di masa depan untuk memastikan pasokan yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil peninjauan dari berbagai literatur menunjukkan bahwa terdapat dua metode utama dalam produksi radioisotop, yaitu melalui reaktor nuklir dan siklotron. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan tantangan tersendiri. Berikut merupakan perbedaan produksi radioisotop ^{99m}Tc menggunakan reaktor nuklir dan siklotron yang dibagi menjadi beberapa kategori:

Tabel 1. Perbandingan Produksi ^{99m}Tc Berbasis Reaktor dan Siklotron

Kategori	Reaktor	Siklotron
Mekanisme produksi	Fisi nuklir	Reaksi nuklir (p, n)
Ketergantungan HEU	Ya	Tidak
Kapasitas produksi	Tinggi	Rendah
Produksi limbah	Tinggi	Rendah
Logistik	Kompleks	Kurang Kompleks
Risiko proliferasi	Tinggi	Rendah
Biaya per unit aktivitas	Rendah	Tinggi
Kematangan teknologi	Matang	Pengembangan
Penerapan regional	Kurang layak	Lebih layak
Skalabilitas	Terukur	Terbatas

Mekanisme Produksi

Produksi reaktor merupakan cara paling umum dan telah digunakan selama beberapa dekade. ^{99m}Tc diperoleh sebagai hasil dari peluruhan Molibdenum-99 (^{99}Mo) yang pada awalnya diproduksi melalui reaksi fisi nuklir uranium-235 (^{235}U) dalam reaktor nuklir. Dalam proses ini, ^{235}U mengalami proses pembelahan inti hingga menghasilkan berbagai produk fisi, salah satunya adalah ^{99}Mo . ^{99}Mo memiliki waktu paruh sekitar 66 jam dan akan mengalami peluruhan beta (β^-) menjadi ^{99m}Tc yang kemudian dapat diekstraksi untuk keperluan medis (Skliarova et al., 2019).

Sedangkan untuk siklotron merupakan alternatif yang lebih baru dan memanfaatkan reaksi nuklir langsung tanpa perlu melalui perantara ^{99}Mo . ^{99m}Tc dapat diproduksi dengan menembakkan proton berenergi tinggi ke target, yaitu molibdenum-100 (^{100}Mo) melalui reaksi nuklir (p, n) yang berarti proton bertumbukan dengan ^{100}Mo sehingga melepaskan neutron dan membentuk ^{99m}Tc secara langsung (Skliarova et al., 2019).

Ketergantungan HEU

Produksi Molibdenum-99 (^{99}Mo) berbasis reaktor sering menggunakan *High Enriched Uranium* (HEU), yang menimbulkan kekhawatiran proliferasi nuklir karena dapat digunakan untuk senjata. Oleh karena itu, organisasi internasional seperti *International Atomic Energy Agency* (IAEA) mendorong peralihan ke *Low Enriched Uranium* (LEU), meskipun konversinya akan menghadapi tantangan teknis dan biaya yang tinggi. Sebagai alternatif, produksi Teknesium-99m (^{99m}Tc) melalui siklotron tidak memerlukan HEU atau fisi nuklir sehingga lebih aman dari segi nonproliferasi. Metode ini langsung mengonversi Molibdenum-100 (^{100}Mo) menjadi ^{99m}Tc tanpa menghasilkan limbah fisi (Ruth, 2020).

Dengan meningkatnya kesadaran akan risiko proliferasi, banyak negara mulai mengadopsi metode siklotron sebagai solusi yang lebih aman dan berkelanjutan. Meskipun masih menghadapi tantangan kapasitas produksi, teknologi ini terus berkembang dan berpotensi menjadi alternatif utama di masa depan.

Kapasitas Produksi

Reaktor nuklir memiliki kapasitas produksi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan siklotron. Hal ini disebabkan oleh efisiensi reaktor dalam menghasilkan ^{99}Mo dalam jumlah besar, yang kemudian digunakan dalam generator ^{99m}Tc di

berbagai fasilitas kesehatan. Berbeda hal dengan siklotron, meskipun dapat memproduksi ^{99m}Tc secara langsung, namun memiliki keterbatasan dalam jumlah radioisotop yang dapat dihasilkan per siklus iradiasi. Sehingga lebih cocok untuk skala regional (Nawar & Türler, 2022).

Produksi Limbah

Salah satu kelemahan utama produksi berbasis reaktor adalah tingginya jumlah limbah radioaktif yang dihasilkan, baik dari target uranium yang telah digunakan maupun produk sampingan fisi lainnya. Di sisi lain, siklotron menghasilkan limbah radioaktif yang jauh lebih sedikit karena hanya melibatkan reaksi nuklir pada target ^{100}Mo , sehingga lebih ramah lingkungan dan lebih mudah dalam hal pengelolaan limbah (Pillai et al., 2015).

Logistik

Distribusi ^{99m}Tc berbasis reaktor melibatkan rantai pasok yang kompleks termasuk produksi, pengolahan, pengangkutan ^{99}Mo ke berbagai rumah sakit, serta pengoperasian generator ^{99m}Tc di lokasi. Proses ini rentan terhadap gangguan dalam pasokan global. Sebaliknya, siklotron memungkinkan produksi ^{99m}Tc secara lokal di rumah sakit atau fasilitas medis dengan akselerator. Sehingga mengurangi ketergantungan pada rantai pasok global dan meningkatkan ketersediaan radioisotop (Nunes et al., 2022).

Risiko Proliferasi

Reaktor nuklir yang menggunakan HEU menghadapi risiko proliferasi nuklir yang lebih tinggi karena bahan baku yang digunakan berpotensi disalahgunakan untuk pembuatan senjata nuklir. Sebaliknya, produksi ^{99m}Tc melalui siklotron menggunakan target ^{100}Mo yang tidak bersifat fisil, sehingga lebih aman dari aspek keamanan nuklir dan kepatuhan terhadap regulasi nonproliferasi (Gumiela, 2018).

Biaya per Aktivitas Unit

Pada produksi radioisotop berbasis reaktor, meskipun memerlukan investasi awal yang besar tetapi memiliki biaya per unit aktivitas ^{99m}Tc yang lebih rendah dikarenakan skala produksi yang besar. Sedangkan pada produksi berbasis siklotron memiliki biaya yang lebih tinggi per unit aktivitas karena keterbatasan dalam kapasitas produksi serta kebutuhan peralatan akselerator berenergi tinggi dan target ^{100}Mo yang relatif mahal (Andhika, 2016).

Kematangan Teknologi

Metode produksi ^{99m}Tc berbasis reaktor telah digunakan selama beberapa dekade dan memiliki infrastruktur yang matang dengan berbagai reaktor yang telah dioptimalkan untuk produksi ^{99}Mo . Pada produksi ^{99m}Tc berbasis siklotron masih dalam tahap pengembangan dan belum diadopsi secara luas. Namun meskipun begitu, teknologi ini terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan skalabilitasnya (Sedarmayanti & Elianie, 2015).

Penerapan Regional

Reaktor nuklir memerlukan investasi besar dan fasilitas khusus yang hanya tersedia di beberapa negara, sehingga distribusinya secara geografis terbatas. Sedangkan siklotron dapat dioperasikan dalam skala lebih kecil dan ditempatkan di berbagai rumah sakit atau pusat medis. Hal ini menjadikannya solusi yang lebih fleksibel untuk memenuhi kebutuhan regional dalam penyediaan radioisotop ^{99m}Tc (Pandi, 2015).

Skalabilitas

Produksi radioisotop ^{99m}Tc berbasis reaktor memiliki tingkat skalabilitas yang tinggi karena dapat menghasilkan ^{99}Mo dalam jumlah besar yang kemudian dikirim ke berbagai fasilitas medis untuk digunakan dalam generator ^{99m}Tc . Sebaliknya, siklotron memiliki keterbatasan dalam kapasitas produksinya karena jumlah ^{99m}Tc yang dihasilkan bergantung pada daya akselerator dan jumlah siklotron yang tersedia di suatu wilayah. Sehingga produksi dengan siklotron menjadi kurang fleksibel dalam memenuhi permintaan skala besar (Nawar & Türler, 2022).

KESIMPULAN

Peninjauan terhadap metode produksi radioisotop ^{99m}Tc menunjukkan bahwa baik reaktor nuklir maupun siklotron memiliki keunggulan dan tantangan masing-masing. Produksi berbasis reaktor telah menjadi metode konvensional dengan kapasitas produksi tinggi, biaya per unit aktivitas yang rendah, serta didukung oleh infrastruktur dan teknologi yang telah matang. Namun, metode ini juga memiliki kelemahan signifikan, seperti ketergantungan pada *High Enriched Uranium* (HEU), potensi risiko proliferasi, produksi limbah radioaktif yang tinggi, serta tantangan dalam hal logistik dan distribusi.

Sementara itu, produksi ^{99m}Tc melalui siklotron menawarkan pendekatan yang lebih modern dan aman dari segi nonproliferasi karena tidak menggunakan bahan fisil. Metode ini juga lebih ramah lingkungan, dengan limbah radioaktif yang jauh lebih sedikit dan sistem distribusi yang lebih sederhana karena dapat dilakukan secara lokal di fasilitas medis. Walau demikian, teknologi ini masih menghadapi kendala pada kapasitas produksi yang terbatas dan biaya yang relatif tinggi per unit aktivitas, serta masih dalam tahap pengembangan untuk mencapai efisiensi optimal.

Dengan meningkatnya kesadaran akan keamanan nuklir dan keberlanjutan pasokan radioisotop, pendekatan siklotron semakin dipertimbangkan sebagai solusi masa depan. Dengan perkembangan teknologi yang terus berlangsung, siklotron memiliki potensi sebagai alternatif produksi ^{99m}Tc yang lebih berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andhika, R. (2016). *Produksi dan Pemurnian Biodiesel dengan Teknologi Membran*. <https://www.researchgate.net/publication/301771175>
- Gumiela, M. (2018). Cyclotron production of ^{99m}Tc : Comparison of known separation technologies for isolation of ^{99m}Tc from molybdenum targets. In *Nuclear Medicine and Biology* (Vol. 58, pp. 33–41). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2017.11.001>
- Johnstone, E. V., Mayordomo, N., & Mausolf, E. J. (2023). Hybridised production of technetium-99m and technetium-101 with fluorine-18 on a low-energy biomedical cyclotron. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 10(1). <https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-023-00089-2>
- Nawar, M. F., & Türler, A. (2022). New strategies for a sustainable ^{99m}Tc supply to meet increasing medical demands: Promising solutions for current problems. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.926258>
- Nunes, B. S., Rodrigues, E. R. F., Fruscalso, J. A. P., Nunes, R. P., Bonatto, A., & Alva-Sánchez, M. S. (2022). Highly Enriched Uranium-Free Medical Radioisotope Production Methods: An Integrative Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app122412569>
- Pandi, L. Y. (2015). *TANTANGAN PENERAPAN CODE OF CONDUCT ON SAFETY OF THE RESEARCH REACTOR*.
- Pillai, M. R. A., Dash, A., & Knapp, F. F. (2013). Sustained availability of ^{99m}Tc : Possible paths forward. *Journal of Nuclear Medicine*, 54(2), 313–323. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.110338>
- Pillai, M. R. A., Dash, A., & Russ Knapp, F. F. (2015). Diversification of $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ separation: Non-fission reactor production of ^{99}Mo as a strategy for enhancing ^{99m}Tc availability. *Journal of Nuclear Medicine*, 56(1), 159–161. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.149609>
- Ruth, T. J. (2020). *The Shortage of Technetium-99m and Possible Solutions*. <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-032020>
- Schaffer, P., Bénard, F., Bernstein, A., Buckley, K., Celler, A., Cockburn, N., Corsaut, J., Dodd, M., Economou, C., Eriksson, T., Frontera, M., Hanemaayer, V., Hook, B., Klug, J., Kovacs, M., Prato, F. S., McDiarmid, S., Ruth, T. J., Shanks, C., ... Zavodszky, P. A. (2015). Direct Production of ^{99m}Tc via $^{100}\text{Mo}(p,2n)$ on Small Medical Cyclotrons. *Physics Procedia*, 66, 383–395. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.048>
- Sedarmayanti, & Elianie, E. L. (2015). *PENGARUH KOMPETENSI PEGAWAI TERHADAP EFEKTIVITAS PENATAUSAHAAN BARANG PERSEDIAAN PUSAT SAINS DAN TEKNOLOGI NUKLIR TERAPAN-BANDUNG Sedarmayanti Ertis Lita Elianie*.
- Skliarova, H., Cisternino, S., Cicoria, G., Marengo, M., & Palmieri, V. (2019). Innovative target for production of technetium-99m by biomedical cyclotron. *Molecules*, 24(1). <https://doi.org/10.3390/molecules24010025>