

Makalah Ilmiah Populer

Analisis Pengaruh Variasi Waktu Iradiasi terhadap Akumulasi Aktivitas Radionuklida Hasil Aktivasi pada Holder Aluminium dalam Produksi Radioisotop Cu-64 Menggunakan Simulasi PHITS

*Artikel ilmiah ini disusun dalam rangka
untuk pemenuhan capaian kinerja mahasiswa*



Disusun pada tanggal 30 Juni 2026 oleh :
Theresa Anggreeni / Elektronika Instrumentasi / 022300016

Dosen Pembimbing :

Prof. Dr. Imam Kambali

**POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA**

2026

**LEMBAR PERSETUJUAN
MAKALAH ILMIAH**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU IRADIASI TERHADAP AKUMULASI
AKTIVITAS RADIONUKLIDA HASIL AKTIVASI PADA HOLDER ALUMINIUM
DALAM PRODUKSI RADIOISOTOP CU-64 MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS**

Disusun oleh
Theresa Anggreeni / Elektronika Instrumentasi / 022300016

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 9 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing



Prof. Dr. Imam Kambali
NIP. 198005052002121005

**ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU IRADIASI TERHADAP AKUMULASI
AKTIVITAS RADIONUKLIDA HASIL AKTIVASI PADA HOLDER ALUMINIUM DALAM
PRODUKSI RADIOISOTOP CU-64 MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRRADIATION TIME VARIATION ON RADIONUCLIDE
ACTIVITY ACCUMULATION IN ALUMINUM TARGET HOLDERS FOR CU-64
RADIOISOTOPE PRODUCTION USING PHITS SIMULATION**

Theresa Anggreeni¹

¹Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – BRIN, Jl. Babarsari, Caturtunggal, Sleman, Yogyakarta 55281

E-mail korespondensi: theresaanggreeni23@gmail.com

Diterima 9 Juli 2026, disetujui 9 Juli 2026

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU IRADIASI TERHADAP AKUMULASI AKTIVITAS RADIONUKLIDA HASIL AKTIVASI PADA HOLDER ALUMINIUM DALAM PRODUKSI RADIOISOTOP CU-64 MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS. Cu-64 merupakan radionuklida yang penting dalam kedokteran nuklir karena dapat digunakan untuk pencitraan PET maupun terapi radionuklida. Salah satu metode produksinya adalah iradiasi proton pada target nikel-64 melalui reaksi ${}^{64}\text{Ni}(p,n){}^{64}\text{Cu}$, di mana holder aluminium yang membungkus target berpotensi mengalami aktivasi oleh partikel sekunder sehingga menghasilkan radionuklida pengotor. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi waktu iradiasi terhadap akumulasi aktivitas radionuklida pengotor pada holder aluminium menggunakan simulasi Monte Carlo PHITS versi 3.360 beserta modul DCHAIN-PHITS, dengan berkas proton 30 MeV dan variasi waktu iradiasi 0,5 hingga 3 jam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa aktivitas Na-24 dan H-3 meningkat hampir linear seiring bertambahnya waktu iradiasi, masing-masing naik sekitar 5,7 dan 6 kali lipat dari 0,5 ke 3 jam, sementara aktivitas total holder relatif konstan karena didominasi radionuklida berumur sangat pendek yang telah jenuh sejak awal iradiasi. Na-24 teridentifikasi sebagai radionuklida pengotor paling relevan untuk keselamatan radiasi pasca-iradiasi karena aktivitasnya besar dan waktu paruhnya (15 jam) memengaruhi lama waktu tunggu penanganan holder, sedangkan H-3 menjadi residu jangka panjang meski kontribusinya kecil. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perpanjangan waktu iradiasi secara konsisten meningkatkan akumulasi aktivitas radionuklida pengotor, sehingga perlu menjadi pertimbangan dalam penentuan durasi iradiasi dan prosedur keselamatan radiasi pada produksi Cu-64.

Kata kunci: Cu-64, PHITS, holder aluminium, aktivasi, Na-24, waktu iradiasi, radionuklida pengotor

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRRADIATION TIME VARIATION ON RADIONUCLIDE ACTIVITY ACCUMULATION IN ALUMINUM TARGET HOLDERS FOR CU-64 RADIOISOTOPE PRODUCTION USING PHITS SIMULATION. Cu-64 is an important radionuclide in nuclear medicine due to its applicability in both PET imaging and radionuclide therapy. One common production method is proton irradiation of a nickel-64 target via the ${}^{64}\text{Ni}(p,n){}^{64}\text{Cu}$ reaction, in which the surrounding aluminum holder may become activated by secondary particles, producing radioactive by-products. This study aims to analyze the effect of irradiation time variation on the accumulated activity of by-product radionuclides in the aluminum holder using PHITS Monte Carlo simulation version 3.360 together with the DCHAIN-PHITS module, employing a 30 MeV proton beam and irradiation times ranging from 0.5 to 3 hours. The simulation results show that the activities of Na-24 and H-3 increase nearly linearly with irradiation time, rising approximately 5.7-fold and 6-fold, respectively, from 0.5 to 3 hours, while the total holder activity remains relatively constant as it is dominated by extremely short-lived radionuclides that reach saturation early in the irradiation process. Na-24 was identified as the most relevant by-product for post-irradiation radiation safety due to its high activity and half-life (15 hours), which influences the required cooling time before the holder can be safely handled, whereas H-3 constitutes a long-term residue despite its small contribution. This study concludes that extending irradiation time consistently increases the accumulated activity of by-product radionuclides, which should be considered in determining irradiation duration and radiation safety procedures in Cu-64 production.

Keywords: Cu-64, PHITS, aluminum holder, activation, Na-24, irradiation time, by-product radionuclide

PENDAHULUAN

Cu-64 merupakan radionuklida yang semakin diminati dalam kedokteran nuklir karena dapat memancarkan positron, partikel beta negatif, dan elektron Auger sekaligus, sehingga bisa dimanfaatkan untuk pencitraan PET maupun terapi radionuklida (theranostic) [1]. Salah satu metode produksinya adalah iradiasi proton langsung pada target nikel-64 (^{64}Ni) menggunakan siklotron melalui reaksi $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ [2], dengan jendela energi optimum berdasarkan studi terdahulu berada di kisaran 9–12 MeV [3]. Namun, penggunaan energi proton yang lebih tinggi berpotensi menghasilkan lebih banyak partikel sekunder (terutama neutron), yang dapat mengaktivasi material di sekitar target, termasuk holder-nya. Aluminium umum digunakan sebagai holder target karena ringan dan penampang lintang aktivasinya rendah [4], namun tetap berpotensi menghasilkan radionuklida pengotor seperti ^{24}Na dan ^{27}Mg melalui reaksi $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ dan $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ [5], sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian target holder Cu-64 rute lain, di mana radionuklida pengotor tersebut teridentifikasi terbentuk pada holder aluminium selama iradiasi [6], serta ditegaskan pentingnya aspek keselamatan radiasi dalam desain target holder tersebut [7]. Radionuklida pengotor ini penting dikaji karena berkaitan langsung dengan keselamatan radiasi saat penanganan holder pasca-iradiasi.

Untuk mengestimasi aktivitas radionuklida tersebut tanpa eksperimen langsung yang berisiko dan mahal, penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo PHITS [8] beserta modul DCHAIN-PHITS untuk menghitung akumulasi dan peluruhan aktivitasnya [9], dengan model INCL [10] dan KUROTAMA [11] yang otomatis digunakan PHITS untuk interaksi proton berenergi tinggi seperti pada penelitian ini. Penelitian-penelitian terdahulu umumnya baru menghitung aktivitas radionuklida pengotor pada satu durasi iradiasi saja, sehingga pengaruh variasi waktu iradiasi terhadap akumulasinya belum banyak dibahas secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi waktu iradiasi (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 jam) terhadap akumulasi aktivitas radionuklida pengotor pada holder aluminium dalam produksi Cu-64 melalui reaksi $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$, dengan parameter berkas dan geometri dijaga konstan pada setiap simulasi. Penelitian ini dibatasi pada perhitungan aktivitas radionuklida pengotor pada holder aluminium saja, tanpa mencakup analisis termal, struktural, maupun optimasi efisiensi produksi Cu-64.

METODOLOGI

Penelitian ini bersifat komputasional, sehingga tidak ada bahan fisik yang benar-benar digunakan, semuanya disimulasikan lewat kode simulasi PHITS (*Particle and Heavy Ion Transport code System*) versi 3.360, beserta modul DCHAIN-PHITS untuk menghitung aktivasi dan peluruhan radionuklida. Ada dua material yang dimodelkan, yaitu target nikel-64 (^{64}Ni) berbentuk bola pejal berjari-jari 4 cm dengan densitas 8,90 g/cm³ sebagai bahan baku pembentuk Cu-64 lewat reaksi $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$, dan holder aluminium (^{27}Al) berbentuk cangkang bola setebal 0,5 cm (jari-jari 4 - 4,5 cm) yang membungkus target nikel tersebut.

Simulasi ini bekerja dengan menembakkan berkas proton 30 MeV ke bola nikel yang dibungkus aluminium, lalu PHITS menghitung reaksi yang terjadi menggunakan model INCL dan KUROTAMA, dua model yang otomatis dipakai PHITS untuk interaksi proton berenergi tinggi seperti ini. Tiga *tally* dipasang untuk mengukur hasilnya, yaitu *T-Track* untuk menghitung neutron sekunder di dalam target nikel, *T-Yield* untuk mendata seluruh radioisotop yang terbentuk di holder aluminium, dan *T-Dchain* untuk menghitung aktivitas (Bq) serta perubahannya seiring waktu di holder aluminium. Setiap simulasi menembakkan 1.000.000 proton (10 batch \times 100.000 partikel) dengan arus setara 100 μA . Untuk melihat pengaruh waktu iradiasi, simulasi dijalankan enam kali dengan durasi berbeda (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 jam) sementara parameter lain dijaga tetap sama, dan aktivitas dicatat tepat saat iradiasi selesai agar hasil perbandingan murni mencerminkan pengaruh lama iradiasi. Hasil keenam simulasi kemudian direkap dalam tabel dan grafik untuk melihat pola akumulasi aktivitas dan radionuklida pengotor yang paling dominan.

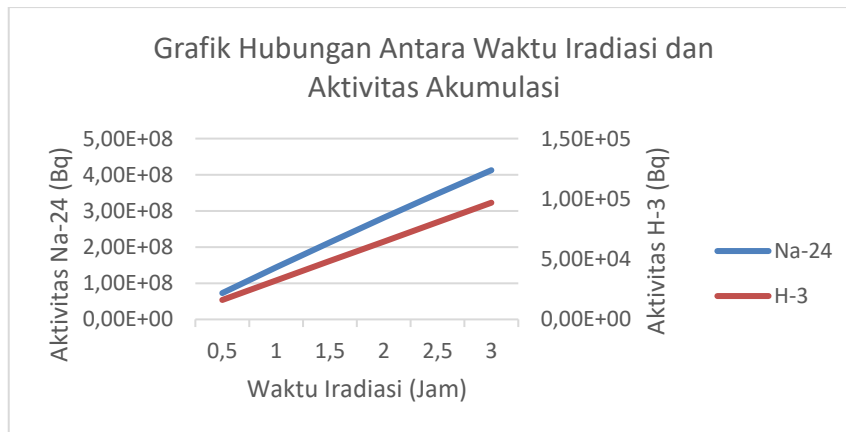
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil tally *T-Dchain* pada holder aluminium, diperoleh data aktivitas Na-24 dan H-3 untuk setiap variasi waktu iradiasi, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Kedua radionuklida ini dipilih karena mewakili dua karakteristik waktu paruh yang saling melengkapi untuk analisis keselamatan radiasi pasca-iradiasi, yaitu Na-24 memiliki waktu paruh 15 jam, sedangkan H-3 memiliki waktu paruh jauh lebih panjang, yaitu 12,3 tahun.

Tabel 1. Aktivitas Na-24 dan H-3 pada holder aluminium untuk setiap variasi waktu iradiasi

Waktu Iradiasi (Jam)	Aktivitas Radionuklida (Bq)		
	Na-24	H-3	Total
0,5	$7,2788 \times 10^7$	$1,6135 \times 10^4$	$2,0538 \times 10^{12}$
1	$1,4391 \times 10^8$	$3,2271 \times 10^4$	$2,0543 \times 10^{12}$
1,5	$2,1341 \times 10^8$	$4,8406 \times 10^4$	$2,0544 \times 10^{12}$
2	$2,8133 \times 10^8$	$6,4541 \times 10^4$	$2,0545 \times 10^{12}$
2,5	$3,4769 \times 10^8$	$8,0676 \times 10^4$	$2,0546 \times 10^{12}$
3	$4,1253 \times 10^8$	$9,6811 \times 10^4$	$2,0547 \times 10^{12}$

Catatan: galat statistik relatif tercatat konsisten pada seluruh variasi waktu iradiasi, yaitu 4,2552% untuk Na-24 dan 35,147% untuk H-3.



Gambar 1. Tren peningkatan aktivitas Na-24 dan H-3 terhadap waktu iradiasi

Tabel 1 dan Gambar 1 menunjukkan bahwa aktivitas Na-24 dan H-3 sama-sama meningkat hampir linear seiring bertambahnya waktu iradiasi. Pola ini sesuai dengan persamaan pertumbuhan aktivitas:

$$A_t = A_{sat}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

Karena waktu paruh kedua radionuklida jauh lebih panjang daripada rentang waktu iradiasi yang disimulasikan, nilai λt masih kecil sehingga kurva belum mendekati titik jenuh dan tampak hampir linear. Meski demikian, aktivitas H-3 memiliki galat statistik jauh lebih besar (35,147%) dibanding Na-24 (4,2552%), sehingga trennya perlu diperhatikan dengan hati-hati.

Sebaliknya, aktivitas total holder relatif konstan karena didominasi radionuklida lain berumur pendek yang sudah jenuh sejak awal iradiasi. Hal ini menegaskan bahwa variasi waktu tidak tampak jika hanya dilihat dari aktivitas total, melainkan harus ditinjau per-radionuklida.

Dari sisi keselamatan radiasi, Na-24 adalah radionuklida yang paling relevan diperhatikan pasca radiasi. Aktivasinya besar dan waktu paruhnya (15 jam) cukup panjang untuk memengaruhi lama waktu tunggu (*cooling time*) sebelum holder aman ditangani. H-3, meskipun kontribusinya jauh lebih kecil, tetap perlu dicatat karena waktu paruhnya yang sangat panjang (12,3 tahun) menjadikannya residu jangka panjang di dalam material holder. Temuan Na-24 sebagai pengotor dominan ini sejalan dengan penelitian target holder Cu-64 yang lainnya serta studi aktivitas aluminium akibat neutron secara umum, yang memperkuat validitas hasil simulasi ini.

KESIMPULAN

Simulasi PHITS terhadap holder aluminium pada produksi radioisotop Cu-64 melalui reaksi $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ menunjukkan bahwa variasi waktu iradiasi (0,5 hingga 3 jam) berpengaruh signifikan terhadap akumulasi aktivitas radionuklida pengotor Na-24 dan H-3, yang meningkat hampir linear seiring bertambahnya durasi iradiasi. Namun demikian, pengaruh ini tidak tercermin pada aktivitas total holder yang relatif konstan, karena didominasi

radionuklida lain berumur sangat pendek yang telah jenuh sejak awal iradiasi, sehingga analisis pengaruh waktu iradiasi perlu dilakukan secara spesifik per-radionuklida, bukan hanya berdasarkan aktivitas total. Dari perspektif keselamatan radiasi, Na-24 teridentifikasi sebagai radionuklida pengotor yang paling relevan diperhatikan pasca-iradiasi karena aktivitasnya besar dan waktu paruhnya mempengaruhi lama waktu tunggu sebelum holder aman ditangani, sementara H-3 mesti kontribusinya kecil tetap menjadi residu jangka panjang akibat waktu paruhnya yang sangat panjang. Dengan demikian, penelitian ini berhasil menjawab tujuan yang ditetapkan, yaitu menunjukkan bahwa perpanjangan waktu iradiasi secara konsisten meningkatkan akumulasi aktivitas radionuklida pengotor pada holder aluminium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan penyertaan-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Prof. Dr. Imam Kambali atas bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama proses penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – BRIN atas dukungan akademik yang diberikan. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada keluarga serta rekan-rekan yang telah memberikan doa, dukungan, dan semangat selama proses penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Peng, "Recent Advances in Cancer Imaging with $^{64}\text{CuCl}_2$ PET/CT," Apr. 01, 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s13139-022-00738-6.
- [2] S. Baruta, R. Leonte, D. Cocioaba, L. Craciun, C. A. Ur, and D. Niculae, "Cyclotron production of ^{64}Cu by proton irradiation of enriched ^{64}Ni target: Validation of Geant4 simulation parameters through experimental data," *Front. Phys.*, vol. 10, Nov. 2022, doi: 10.3389/fphy.2022.1038014.
- [3] F. Szelecsényi, G. Blessing, and S. M. Qaim, "Excitation functions of proton induced nuclear reactions on enriched ^{61}Ni and ^{64}Ni : Possibility of production of no-carrier-added ^{61}Cu and ^{64}Cu at a small cyclotron," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 44, no. 3, pp. 575–580, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(93\)90172-7](https://doi.org/10.1016/0969-8043(93)90172-7).
- [4] X. U. Jun-Kui *et al.*, "Simulation of induced radioactivity for Heavy Ion Medical Machine."
- [5] K. P. Egger and V. Krivan, "Neutron activation analysis of aluminium with radiochemical separation of ^{24}Na ," *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, vol. 323, no. 8, pp. 827–832, 1986, doi: 10.1007/BF00475765.
- [6] K. Fajarwati, W. Setia, B. A. Ngurah, A. Ketut Umiati, and I. Kambali, "A novel method for Cu-64 radioisotope production by secondary neutrons irradiation of natural ZnO and enriched ^{64}ZnO targets." [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=5230481>
- [7] I. Kambali *et al.*, "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*, vol. 199, no. 5, pp. 829–837, May 2025, doi: 10.1080/00295639.2024.2392070.
- [8] T. Sato *et al.*, "Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 127–135, Jan. 2024, doi: 10.1080/00223131.2023.2275736.
- [9] H. N. Ratliff *et al.*, "Modernization of the DCHAIN-PHITS activation code with new features and updated data libraries," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 484, pp. 29–41, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.10.005>.
- [10] A. Boudard, J. Cugnon, J.-C. David, S. Leray, and D. Mancusi, "New potentialities of the Li⁺ eige intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles," *Phys. Rev. C*, vol. 87, no. 1, p. 14606, Jan. 2013, doi: 10.1103/PhysRevC.87.014606.

- [11] K. Iida, A. Kohama, and K. Oyamatsu, "Formula for Proton–Nucleus Reaction Cross Section at Intermediate Energies and Its Application," *J. Physical Soc. Japan*, vol. 76, no. 4, p. 044201, Apr. 2007, doi: 10.1143/JPSJ.76.044201.