

Makalah Ilmiah Populer

Analisis Pengaruh Variasi Energi Proton terhadap Yield Radioaktivitas dan Pengotor Radioaktif pada Target Natural Zinc Oxide (ZnO) Menggunakan Simulasi PHITS

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



Disusun pada tanggal 06 Juli 2026 oleh :
Noor Fatih Farahat Parvez / Elektronika Instrumentasi / 022300012

Dosen Pengampu/Pembimbing :

Prof. Dr. Imam Kambali

**POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA
2026**

**LEMBAR PERSETUJUAN
MAKALAH ILMIAH**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI ENERGI PROTON TERHADAP YIELD
RADIOAKTIVITAS DAN PENGOTOR RADIOAKTIF PADA TARGET NATURAL
ZINC OXIDE (ZNO) MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS**

Disusun oleh
Noor Fatih Farahat Parvez / Elektronika Instrumentasi / 022300012

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 13 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing/Dosen Pengampu Matakuliah



Prof. Dr. Imam Kambali
NIP. 19800505 200212 1 005

ANALISIS PENGARUH VARIASI ENERGI PROTON TERHADAP YIELD RADIOAKTIVITAS DAN PENGOTOR RADIOAKTIF PADA TARGET NATURAL ZINC OXIDE (ZNO) MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PROTON ENERGY VARIATION ON RADIOACTIVITY YIELD AND RADIOACTIVE IMPURITIES IN A NATURAL ZINC OXIDE TARGET (ZNO) USING PHITS SIMULATION

Noor Fatih Farahat Parvez

Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Jl. Babarsari Kotak POB 6101YKKB, Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta 55281

noorfatih7@gmail.com

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH VARIASI ENERGI PROTON TERHADAP YIELD RADIOAKTIVITAS DAN PENGOTOR RADIOAKTIF PADA TARGET NATURAL ZINC OXIDE (ZNO) MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS. Produksi radionuklida untuk keperluan kedokteran nuklir umumnya dilakukan melalui iradiasi proton pada target tertentu, namun proses ini juga berpotensi menghasilkan radionuklida pengotor yang memengaruhi kemurnian produk akhir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi energi proton terhadap fluks neutron, yield radioaktivitas, dan pembentukan pengotor radioaktif pada target natural zinc oxide (ZnO). Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi Monte Carlo menggunakan software PHITS dengan variasi energi proton 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 MeV pada target ZnO berbentuk bola berdensitas 5,61 g/cm³, menggunakan tally T-Track, T-Yield, dan T-Dchain untuk memperoleh fluks neutron, yield reaksi, dan inventori radionuklida hasil aktivasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluks neutron meningkat secara konsisten dari tidak terdeteksi pada energi 5 MeV menjadi $6,5338 \times 10^9$ neutron/cm²/lethargy/source pada energi 30 MeV, sejalan dengan konsep energi ambang berdasarkan hukum Coulomb. Pembentukan radionuklida baru mulai teramati pada energi 20 MeV berupa penyusutan isotop Zn-67 dan Zn-68, dan meningkat signifikan pada 30 MeV disertai munculnya radionuklida baru seperti C-12, O-16, Ca-40, Ni-60, dan Cu-63 yang mengindikasikan aktifnya reaksi spalasi. Hasil ini menunjukkan adanya trade-off antara yield radionuklida yang diinginkan dan tingkat kemurnian produk akhir, sehingga pemilihan energi proton optimal perlu mempertimbangkan keseimbangan antara keduanya dalam skema produksi radioisotop berbasis target ZnO.

Kata kunci: energi proton, yield radioaktivitas, pengotor radioaktif, zinc oxide, simulasi PHITS, hukum Coulomb, DCHAIN

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PROTON ENERGY VARIATION ON RADIOACTIVITY YIELD AND RADIOACTIVE IMPURITIES IN A NATURAL ZINC OXIDE TARGET (ZNO) USING PHITS SIMULATION. Radionuclide production for nuclear medicine purposes is generally carried out through proton irradiation of a specific target; however, this process may also produce impurity radionuclides that affect the purity of the final product. This study aims to analyze the effect of proton energy variation on neutron flux, radioactivity yield, and the formation of radioactive impurities in a natural zinc oxide (ZnO) target. The research method used was Monte Carlo simulation using PHITS software, varying the proton energy at 5, 10, 15, 20, 25, and 30 MeV on ZnO target with a density of 5.61 g/cm³, using T-Track, T-Yield, and T-Dchain tallies to obtain the neutron flux, reaction yield, and radionuclide inventory resulting from activation. The results show that the neutron flux increased consistently from undetected at 5 MeV to 6.5338×10^9 neutron/cm²/lethargy/source at 30 MeV, consistent with the threshold energy concept based on Coulomb's law. The formation of new radionuclides was first observed at 20 MeV in the form of Zn-67 and Zn-68 depletion, and increased significantly at 30 MeV along with the appearance of new radionuclides such as C-12, O-16, Ca-40, Ni-60, and Cu-63, indicating the activation of spallation reactions. These findings indicate a trade-off between the desired radionuclide yield and the purity level of the final product, so that the selection of an optimal proton energy must consider the balance between the two in a ZnO-based radioisotope production scheme.

Keywords: proton energy, radioactivity yield, radioactive impurities, zinc oxide, PHITS simulation, Coulomb's law, DCHAIN

PENDAHULUAN

Pemanfaatan radionuklida dalam bidang kedokteran nuklir terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan radioisotop untuk keperluan diagnostik maupun terapi. Salah satu metode produksi radionuklida yang banyak digunakan adalah iradiasi target menggunakan berkas proton dari akselerator siklotron, di mana proton berenergi tinggi ditembakkan pada suatu target untuk memicu reaksi inti yang menghasilkan radionuklida tertentu [3], [4]. Salah satu bahan target yang menarik untuk dikaji adalah zinc oxide (ZnO), karena unsur zinc alami memiliki beberapa isotop yang dapat mengalami reaksi (p,n) maupun (p,xn) menjadi radionuklida gallium yang penting dalam pencitraan medis, seperti ^{66}Ga , ^{67}Ga , dan ^{68}Ga , sebagaimana telah dibuktikan secara eksperimental melalui pengukuran penampang lintang reaksi $\text{natZn}(p,x)^{67}\text{Ga}$ [5], [6]. Sebagai contoh dalam penerapan praktis reaksi $^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$ telah dimanfaatkan secara rutin untuk produksi radionuklida ^{68}Ga dalam jumlah besar menggunakan siklotron medis guna memenuhi kebutuhan klinis pencitraan PET [10].

Namun demikian, proses iradiasi proton pada target tidak hanya menghasilkan radionuklida yang diinginkan, tetapi juga berpotensi membentuk radionuklida lain sebagai pengotor radioaktif (*radioactive impurities*) akibat terbukanya berbagai kanal reaksi inti pada energi proton tertentu [3]. Pembentukan pengotor ini kemudian menjadi perhatian penting karena dapat memengaruhi kemurnian radionuklidik produk akhir serta menambah kompleksitas dalam proses pemurnian dan penanganan pascairadiasi [3], [4]. Oleh karena itu, pemahaman mengenai bagaimana variasi energi proton memengaruhi yield radioaktivitas dan pembentukan pengotor radioaktif menjadi hal yang penting untuk dikaji sebelum suatu skema produksi radioisotop diterapkan secara praktis.

Interaksi antara proton dan inti target pada dasarnya dibatasi oleh gaya tolak-menolak elektrostatis antara proton yang bermuatan positif dan inti atom target yang juga bermuatan positif. Fenomena ini dijelaskan oleh hukum Coulomb, yang menyatakan bahwa besar gaya interaksi antara dua muatan listrik berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar keduanya:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

Dengan F adalah gaya Coulomb, k adalah konstanta Coulomb, q_1 dan q_2 adalah muatan masing-masing partikel, dan r adalah jarak antara keduanya [2]. Dalam reaksi inti, hukum Coulomb inilah yang mendasari konsep energi ambang reaksi: proton harus memiliki energi kinetik yang cukup untuk mengatasi gaya tolak elektrostatis dari inti target agar dapat mendekat hingga jangkauan gaya nuklir kuat dan memicu reaksi inti [2]. Semakin besar nomor atom target, semakin besar energi minimum yang dibutuhkan proton untuk dapat bereaksi secara efektif. Prinsip ini menjadi dasar pemilihan rentang variasi energi proton pada penelitian ini, yaitu energi 5–30 MeV, untuk mengamati pengaruhnya terhadap fluks neutron, yield radionuklida, serta pembentukan pengotor radioaktif pada target ZnO.

Simulasi Monte Carlo menjadi pendekatan yang umum digunakan untuk memodelkan interaksi radiasi dengan materi tanpa memerlukan eksperimen iradiasi langsung yang memakan biaya dan waktu. Salah satu *software* yang banyak digunakan untuk keperluan ini adalah *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS), yang mampu mensimulasikan transport berbagai jenis partikel (termasuk proton dan neutron) pada rentang energi yang luas, serta menghitung yield radionuklida hasil aktivasi melalui modul DCHAIN yang terintegrasi di dalamnya [1], [11]. Kode ini terus dikembangkan sejak versi awalnya [9] hingga versi-versi selanjutnya seperti PHITS 2.52 [8] dan PHITS 3.02 [1], dengan peningkatan berkelanjutan pada model reaksi inti dan cakupan energi yang dapat disimulasikan. Pendekatan simulasi seperti ini telah banyak digunakan dalam studi produksi radioisotop maupun evaluasi pengotor radioaktif pada berbagai jenis target, termasuk simulasi reaksi spalasi pada energi proton menengah ke atas [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi energi proton terhadap fluks neutron, yield radioaktivitas, serta pembentukan radionuklida pengotor pada target ZnO menggunakan simulasi PHITS. Penelitian ini dibatasi pada simulasi numerik tanpa validasi eksperimen langsung, dengan variasi energi proton 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 MeV, serta hanya meninjau target ZnO alami (tanpa pengayaan isotop). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai rentang energi proton yang optimal untuk produksi radionuklida dengan tingkat pengotor radioaktif yang minimal pada target berbasis ZnO.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode simulasi Monte Carlo dengan *software* PHITS versi 3.36 untuk memodelkan interaksi berkas proton dengan target ZnO [1]. PHITS versi 3.36 merupakan pengembangan lanjutan

dari versi 3.33 yang dideskripsikan oleh Sato et al [1]. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan energi proton pada nilai 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 MeV untuk mengamati pengaruhnya terhadap fluks neutron, yield radionuklida, serta pembentukan radionuklida pengotor pada target.

1. Geometri dan Material Target

Target ZnO alami dimodelkan sebagai geometri bola dengan radius 4,0 cm (volume 268,08 cm³) dan densitas 5,61 g/cm³, menggunakan fitur *General Geometry* (GG) pada PHITS. Target dibungkus oleh wadah aluminium setebal 0,5 cm (radius 4,0–4,5 cm) dengan densitas 2,70 g/cm³ yang berfungsi sebagai penahan target, dikelilingi ruang vakum hingga radius 20 cm sebagai batas luar sistem. Sumber proton didefinisikan sebagai berkas kolimasi berbentuk lingkaran dengan radius 0,5 cm, diposisikan pada jarak 5 cm dari pusat target dan diarahkan tegak lurus menuju target, dengan energi monoenergetik sesuai variasi yang diteliti (5, 10, 15, 20, 25, dan 30 MeV).

2. Model Fisika

Simulasi transport partikel dan reaksi inti dilakukan menggunakan pengaturan baku (default) PHITS untuk model reaksi inti dan pustaka data nuklir, tanpa modifikasi tambahan pada kartu parameter data nuklir. Untuk reaksi pada energi yang melibatkan mekanisme spalasi/multifragmentasi, PHITS menggunakan model intranuclear cascade seperti INCL (*Liège Intranuclear Cascade*) [7].

3. Tally

Tiga jenis tally digunakan dalam simulasi ini untuk memperoleh besaran fisis yang berbeda:

- 1) T-Track, digunakan untuk menghitung fluks neutron sekunder yang dihasilkan dari reaksi (p,xn) pada target, dinyatakan dalam satuan neutron/cm²/lethargy/source.
- 2) T-Yield, digunakan untuk menghitung yield produksi partikel/nuklida hasil reaksi inti secara langsung.
- 3) T-Dchain, digunakan untuk menghitung inventori radionuklida hasil aktivasi (termasuk radionuklida pengotor) melalui perhitungan burn-up/build-up rantai peluruhan menggunakan modul DCHAIN yang terintegrasi dalam PHITS [1], [11].

4. Parameter Simulasi

Setiap simulasi dijalankan dengan 100.000 partikel sumber per batch dan 10 batch (total 1×10⁶ partikel sumber) untuk memastikan ketidakpastian statistik (relative error) berada pada tingkat yang dapat diterima. Untuk perhitungan aktivasi dengan T-Dchain, target diasumsikan diiradiasi selama 1 jam dengan intensitas berkas relatif konstan, dilanjutkan dengan waktu pendinginan (*cooling*) selama 1 hari tanpa iradiasi. Inventori radionuklida dievaluasi pada waktu 1 hari setelah akhir iradiasi, dengan intensitas berkas proton diskalakan menggunakan faktor amplitudo 6,242×10¹⁴ partikel/s, ekuivalen dengan arus berkas proton sekitar 100 μA.

5. Prosedur Analisis Data

Data keluaran simulasi berupa fluks neutron, yield reaksi, dan inventori radionuklida untuk setiap variasi energi proton kemudian direkapitulasi dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Analisis dilakukan dengan membandingkan tren fluks neutron dan yield radionuklida terhadap energi proton, serta mengidentifikasi radionuklida yang berpotensi menjadi pengotor radioaktif pada masing-masing variasi energi. Interpretasi hasil turut mempertimbangkan prinsip fisika reaksi inti, khususnya konsep ambang energi berdasarkan hukum Coulomb [2], serta perbandingan dengan data reaksi monitor natZn(p,xn)Ga yang telah dievaluasi pada energi 5–30 MeV [6].

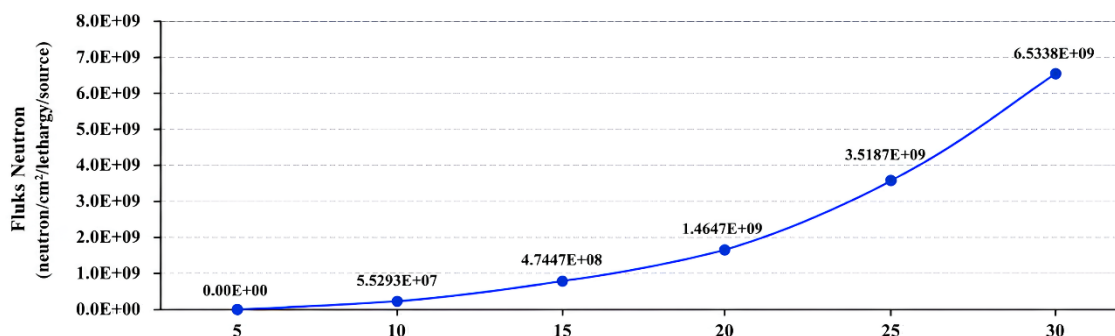
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini diperoleh melalui simulasi iradiasi proton pada target ZnO menggunakan *software* PHITS dengan variasi energi proton sebesar 5-30 MeV. Data yang diperoleh meliputi nilai fluks neutron, yield radioaktivitas, serta radionuklida hasil aktivasi (pengotor radioaktif) yang terbentuk pada setiap variasi energi proton. Data hasil simulasi kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menganalisis pengaruh variasi energi proton terhadap peningkatan fluks neutron, yield radioaktivitas, serta pembentukan pengotor radioaktif pada target ZnO.

Tabel 1. Hasil Fluks Neutron pada Variasi Energi Proton

Energi Proton (MeV)	Fluks Neutron (neutron/cm ² /lethargy/source)	Relative Error
5	0.0000 × 10 ⁰	0.0000
10	5.5293 × 10 ⁷	0.2238
15	4.7447 × 10 ⁸	0.0768
20	1.4647 × 10 ⁹	0.0427

Energi Proton (MeV)	Fluks Neutron (neutron/cm ² /lethargy/source)	Relative Error
25	3.5187×10^9	0.0274
30	6.5338×10^9	0.0203



Gambar 1. Grafik Hubungan Antara Variasi Energi Proton dan Fluks Neutron

Penentuan fluks neutron dilakukan dengan memvariasikan energi proton dari 5 MeV hingga 30 MeV pada target ZnO. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa hubungan meningkat secara konsisten antara energi proton dan fluks neutron yang telah dihasilkan. Pada energi 5 MeV, tidak terdeteksi fluks neutron sama sekali. Sedangkan, pada energi 10 MeV fluks neutron mulai muncul sebesar $5,523 \times 10^7$ neutron/cm²/lethargy/source dan terus meningkat hingga mencapai $6,5338 \times 10^9$ neutron/cm²/lethargy/source pada energi 30 MeV. Grafik yang ditunjukkan pada gambar 1 memperlihatkan pola kenaikan yang tajam pada rentang energi 10-30 MeV.

Tidak terbentuknya neutron pada 5 MeV berkaitan dengan gaya tolak-menolak elektrostatis antara proton yang bermuatan positif dan inti target yang juga bermuatan positif, sebagaimana dijelaskan oleh hukum Coulomb. Proton perlu memiliki energi kinetik yang cukup untuk mengatasi gaya tolak agar dapat mendekati inti dan memicu reaksi nuklir. Berdasarkan hukum Coulomb, besarnya energi potensial tolak-menolak bergantung pada muatan proton dan muatan inti target serta jarak di antara keduanya. Untuk target ZnO dengan nomor atom Zn sekitar 30, nilai energi potensialnya diperkirakan berada pada kisaran 7 MeV, sehingga pada energi 5 MeV proton belum mampu mengatasi gaya tolak tersebut dan reaksi (p,n) belum dapat terjadi secara signifikan. Begitu energi proton melampaui nilai ini, reaksi (p,n) mulai berlangsung secara efektif dan fluks neutron meningkat seiring bertambahnya energi.

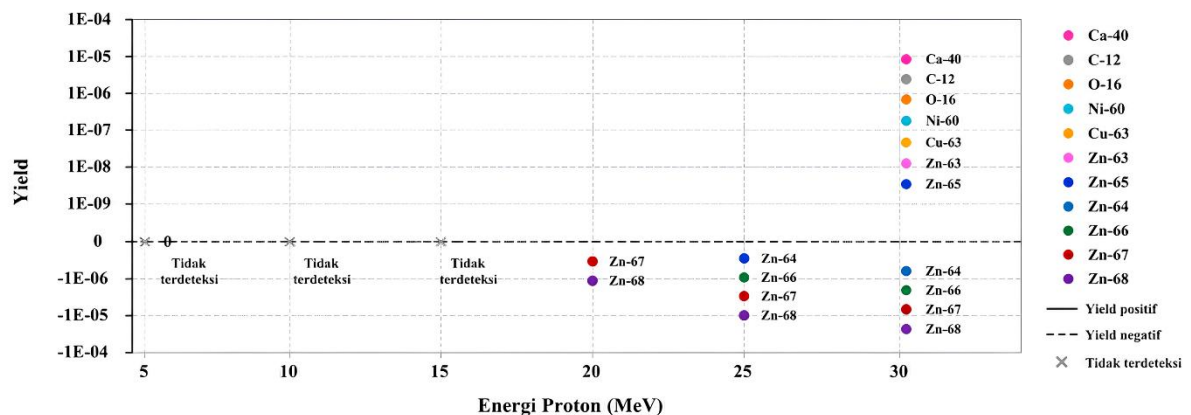
Peningkatan fluks neutron yang cukup besar dari energi 10 MeV hingga 30 MeV dapat dikaitkan dengan terbukanya kanal reaksi (p,xn) secara bertahap. Reaksi (p,n) mendominasi pada energi rendah, kemudian disusul oleh kanal (p,2n) dan (p,3n) yang memiliki ambang energi lebih tinggi. Pola ini sejalan dengan reaksi monitor natZn(p,xn)⁶⁶Ga, ⁶⁷Zn(p,n)⁶⁷Ga, dan natZn(p,xn)⁶⁸Ga yang umum dievaluasi hingga energi 30 MeV untuk keperluan produksi radioisotop berbasis target zinc, sehingga rentang energi yang digunakan pada penelitian mencakup wilayah yang relevan.

Nilai relative error yang menurun seiring naiknya energi, dari 0,2238 pada energi 10 MeV menjadi 0,0203 pada energi 30 MeV, menunjukkan bahwa ketidakpastian statistik simulasi Monte Carlo semakin kecil ketika jumlah neutron yang tertangkap tally semakin banyak. Hal ini menandakan bahwa simulasi pada energi tinggi memiliki tingkat kepercayaan yang lebih baik dibandingkan pada energi rendah.

Tabel 2. Hasil Yield Radionuklida pada Variasi Energi Proton

Energi (MeV)	Radionuklida yang Terbentuk	Yield
5	Tidak terdeteksi	0
10	Tidak terdeteksi	0
15	Tidak terdeteksi	0
20	Zn-67	-1.000×10^{-6}
	Zn-68	-1.000×10^{-6}
25	Zn-64	-2.000×10^{-6}
	Zn-66	-4.000×10^{-6}
	Zn-67	-2.000×10^{-6}
	Zn-68	-2.891×10^{-6}

Energi (MeV)	Radionuklida yang Terbentuk	Yield
30	Ca-40	3.000×10^{-6}
	C-12	2.000×10^{-6}
	O-16	4.000×10^{-6}
	Ni-60	1.000×10^{-6}
	Cu-63	2.000×10^{-6}
	Zn-63	1.000×10^{-6}
	Zn-64	-8.924×10^{-6}
	Zn-65	3.000×10^{-6}
	Zn-66	-1.474×10^{-5}
	Zn-67	-7.000×10^{-6}
	Zn-68	-1.759×10^{-5}



Gambar 2. Grafik Yield Radionuklida Akibat Variasi Energi Proton

Pada rentang energi 5-15 MeV dapat dilihat bahwa belum terbentuk radionuklida apapun, hal ini konsisten dengan fluks neutron yang masih nol atau rendah pada energi yang sama. Hal ini menegaskan bahwa aktivasi target ZnO baru berlangsung signifikan setelah energi proton melampaui gaya tolak elektrostatik dari inti target sebagaimana yang telah dijelaskan oleh hukum Coulomb.

Nilai yield yang bertanda negatif pada isotop Zn (Zn-64, Zn-66, Zn-67, dan Zn-68) menunjukkan penyusutan (*burn-up*) isotop induk akibat dikonsumsi oleh reaksi inti, bukan pembentukan isotop baru. Pada energi 20 MeV, penyusutan baru terjadi pada Zn-67 dan Zn-68 dengan magnitudo kecil ($\sim 10^{-6}$), yang mengindikasikan bahwa reaksi (p,n) baru mulai mengonsumsi isotop bernomor massa besar. Pada energi 25 MeV, penyusutan meluas ke Zn-64 dan Zn-66 dengan magnitudo yang lebih besar, menandakan kanal (p,n) dan (p,2n) sudah aktif pada lebih banyak isotop zinc alami.

Pada energi 30 MeV, terjadi perubahan pola yang cukup signifikan. Semakin tinggi energi proton, semakin banyak kanal reaksi inti yang terbuka sehingga variasi radionuklida hasil aktivasi juga semakin meningkat. Selain penyusutan Zn-64, Zn-66, Zn-67, dan Zn-68 yang jauh lebih besar, muncul radionuklida hasil produksi baru berupa fragmen ringan (C-12, O-16) dan fragmen menengah (Ca-40, Ni-60, Cu-63, Zn-63, Zn-65). Munculnya fragmen ringan dari target ZnO mengindikasikan mulai aktifnya mekanisme reaksi spalasi atau multifragmentasi, yang umumnya baru signifikan pada energi proton menengah ke atas karena membutuhkan energi eksitasi inti compound yang besar untuk melepaskan banyak nukleon atau kluster inti sekaligus. Cu-63 dan Ni-60 diduga terbentuk melalui reaksi (p, α) dan (p,xn) pada isotop-isotop Zn yang lebih ringan, sedangkan Ca-40 kemungkinan berasal dari reaksi proton dengan oksigen (O-16) yang merupakan bagian dari matriks ZnO.

Dari sisi pengotor radioaktif, simulasi ini memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai kondisi target pada berbagai rentang energi. Pada energi rendah (≤ 15 MeV), target ZnO relatif bebas dari pengotor karena reaksi inti belum banyak terjadi. Namun, pada energi 20 MeV ke atas khususnya pada energi 30 MeV, jumlah dan variasi radionuklida pengotor meningkat secara signifikan, baik dari sisi banyaknya isotop yang terlibat maupun besarnya nilai produksi dan penyusutannya. Temuan ini sejalan dengan reaksi $\text{natZn}(p,xn)$ yang umum dievaluasi hingga energi 30 MeV untuk produksi radioisotop Ga, di mana energi tinggi memang diperlukan agar yield produk utama memadai, tetapi konsekuensinya adalah semakin banyak radionuklida pengotor yang ikut terbentuk akibat terbukanya kanal reaksi tambahan. Maka, penentuan energi proton optimal untuk iradiasi target ZnO perlu

mempertimbangkan keseimbangan antara yield radionuklida yang diinginkan dan tingkat pengotor radioaktif yang menyertainya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa evaluasi pengaruh variasi energi proton terhadap target ZnO menggunakan simulasi PHITS menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara peningkatan energi proton dengan peningkatan fluks neutron, yield radioaktivitas, dan pembentukan pengotor radioaktif. Pada energi rendah (≤ 15 MeV), belum terjadi aktivasi signifikan karena proton belum mampu mengatasi gaya tolak elektrostatik dari inti target sesuai hukum Coulomb, yang diperkirakan berada pada kisaran 7 MeV, sehingga fluks neutron dan yield radionuklida masih nol. Aktivasi mulai teramati pada energi 20 MeV berupa penyusutan isotop Zn-67 dan Zn-68, meluas pada energi 25 MeV, dan meningkat signifikan pada energi 30 MeV disertai munculnya radionuklida baru seperti C-12, O-16, Ca-40, Ni-60, dan Cu-63 yang mengindikasikan mulai aktifnya mekanisme reaksi spalasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa energi proton yang lebih tinggi meningkatkan jumlah radionuklida hasil aktivasi dan memengaruhi yield radionuklida yang dihasilkan. Penggunaan simulasi PHITS yang dikombinasikan dengan analisis fluks neutron dan yield radionuklida terbukti efektif sebagai alat evaluasi awal untuk menentukan rentang energi proton yang optimal dalam skema produksi radioisotop berbasis target ZnO, dengan mempertimbangkan keseimbangan antara yield yang diinginkan dan tingkat kemurnian radionuklidik produk akhir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas berkat dan karunia-Nya yang dilimpahkan sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah ilmiah populer yang berjudul "Analisis Pengaruh Variasi Energi Proton terhadap Yield Radioaktivitas dan Pengotor Radioaktif pada Target Natural Zinc Oxide (ZnO) Menggunakan Simulasi PHITS". Selanjutnya terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Prof. Dr. Imam Kambali selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu, arahan, dan dukungannya kepada penulis dalam penulisan makalah ilmiah populer ini. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada keluarga dan teman-teman yang telah memberikan dukungan dan semangat dalam pengerjaan makalah. Penulis berharap semoga makalah ilmiah populer ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukannya di kemudian hari.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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, pp. 127-135, 2024.
- [2] K. S. Krane, *Introduction to Nuclear Physics*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1988.
- [3] S. M. Qaim, "Nuclear data for production and medical application of radionuclides: Present status and future needs," *Nucl. Med. Biol.*, vol. 44, pp. 31-49, 2017.
- [4] Y. Wang et al., "Production Review of Accelerator-Based Medical Isotopes," *Molecules*, vol. 27, no. 16, p. 5294, 2022.
- [5] J. A. Wachter et al., "Measurements of ^{67}Ga production cross section induced by protons on natZn in the low energy range from 1.678 to 2.444 MeV," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 344, pp. 59-62, 2015.
- [6] A. Hermanne et al., "New cross section data on $^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$ and $\text{natZn}(p,xn)^{67}\text{Ga}$ nuclear reactions for the development of a reference data base," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 240, pp. 623-629, 1999.
- [7] A. Boudard et al., "New potentialities of the Liège intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles," *Phys. Rev. C*, vol. 87, p. 014606, 2013.
- [8] T. Sato et al., "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 9, pp. 913-923, 2013.
- [9] H. Iwase et al., "Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 11, pp. 1142-1151, 2002.
- [10] M. Lin et al., "Production of curie quantities of ^{68}Ga with a medical cyclotron via the $^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$ reaction," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 133, pp. 1-3, 2018.
- [11] 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.