

Studi pemodelan efisiensi detektor HPGe-CsI(Tl) menggunakan Monte Carlo n-Particle (MCNP)

Siti Khodijah, Ngurah Ayu Ketut Umiati, Fajar Arianto*

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro

Jl. Lkr. Utara Undip, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang 50275

*email: fajararianto@fisika.fsm.undip.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan simulasi detektor HPGe dan CsI(Tl) menggunakan program MCNP. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui efek jarak sumber dan material housing terhadap efisiensi detektor. Simulasi dilakukan dengan memasukkan kode masukan agar terbentuk geometri detektor. Termasuk pemilihan jenis sumber, tally dan pengaturan jarak. Aluminium dan *stainless steel* ditetapkan sebagai material housing. Penyinaran radiasi terhadap detektor searah sumbu x dengan variasi 0,75 hingga 3,75 cm dapat dijalankan. Hasil simulasi menampilkan nilai cacah pada tiap-tiap bin energi yang telah ditentukan dan nilai kesalahannya masing-masing. Penggunaan housing pada detektor dan jarak sumber berpengaruh terhadap pencacahan. Nilai efisiensi terbaik detektor HPGe dan CsI(Tl) berturut-turut adalah $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ dan $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ untuk housing aluminium. Hasil simulasi ini bersesuaian dengan teori yang ada.

Kata kunci: HPGe, CsI(Tl), Efisiensi, Aluminium, Stainless steel..

Abstract – Simulation of HPGe and CsI(Tl) detectors have been carried out by using the MCNP program. This study aims to determine the effect of source distance and housing material on detector efficiency. Simulation is carried out by entering input code to form the detector geometry. Including selection of source type, tally and distance settings. Aluminum and stainless steel as a housing materials. Radiation irradiation to the detector in the direction of the x-axis with a variation of 0.75 to 3.75 cm. . The output of the MCNP program is to display the count value for each predetermined energy bin and the error value of each. The simulation results show that the use of housing of the detector and the distance of the source affect the enumeration. The best efficiency values for the HPGe and CsI(Tl) detectors are $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ and $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ of the aluminium housing. The results of simulation show results that are in accordance with the theory.

Key words: HPGe, CsI(Tl), Efficiency, Aluminium, Stainless steel.

PENDAHULUAN

Pengukuran dan identifikasi radionuklida dapat dilakukan dengan spektroskopi gamma. Daya tembus yang besar yang dimiliki sinar gamma menjadikan kelebihan tersendiri sehingga tidak memerlukan preparasi cuplikan yang rumit. Dalam mengidentifikasi atau melakukan pengukuran membutuhkan sumber radiasi dan alat ukur standar yaitu MCA dan SCA (Oktajianto et al, 2015). Dalam pengukurannya, spektrometer gamma akan mengeluarkan data berupa cacahan sebagai fungsi energi [2]. Keberhasilan pengukuran dengan spektrometri gamma ini sangat bergantung pada kualitas analisis spektrum gamma yang dihasilkan oleh detektor.

Detektor memiliki peranan penting berkaitan dengan bahan radioaktif. Sebagai contoh misalnya, detektor radiasi gamma yang berfungsi untuk menangkap radiasi, kemudian

mengubahnya menjadi sinyal atau pulsa listrik [3]. Pada perkembangannya, detektor jenis semikonduktor seperti detektor HPGe berhasil menjadikan metode pengukuran yang berkembang lebih pesat. Hal ini dikarenakan germanium memiliki daya pisah tinggi sehingga sangat baik digunakan pada spektroskopi gamma. Detektor germanium kemurnian tinggi atau yang disebut dengan HPGe cocok digunakan pada spektroskopi sinar gamma, karena memiliki resolusi yang sangat baik berkisar 0,18% pada 662 keV, volume kristal yang tersedia cukup besar dan jumlah nomor atom (Z) unsur germanium tinggi sehingga dapat meningkatkan daya henti sinar gamma [4].

Beberapa kajian tentang kristal penyusun detektor terus berkembang termasuk kristal CsI(Tl) yang tergolong kedalam jenis sintilator. Terdapat dua jenis sintilator yaitu organik dan anorganik [5]. *Cesium Iodide doped Thallium* atau CsI(Tl) diketahui sebagai salah satu

sintilator anorganik yang memiliki output sorotan paling terang sehingga dapat meningkatkan sinyal dan resolusi energi. Selain manfaatnya untuk identifikasi sumber radioaktif, CsI(Tl) juga telah digunakan untuk aplikasi keamanan, penelitian ruang angkasa dan kedokteran nuklir [6].

Untuk mendapatkan analisis yang akurat dalam metode spektroskopi gamma adalah dengan cara mengetahui efisiensinya. Selain menggunakan kalibrasi sumber standar, menentukan efisiensi juga dapat dilakukan dengan model perhitungan atau simulasi (Rasito, dkk). Salah satu metode perhitungan yang dapat digunakan adalah monte carlo dengan salah satu program komputernya yaitu Monte Carlo N-Particle (MCNP) yang diketahui tepat mereproduksi respon detektor untuk berbagai bentuk geometri detektor dengan akurasi yang memadai [7].

MCNP merupakan piranti lunak komputer menggunakan metode monte carlo yang dapat digunakan dalam berbagai bidang seperti pemodelan untuk proteksi radiologi, instalasi nuklir, perisai dan detektor [1]. Beberapa penelitian berkaitan dengan metode monte carlo telah banyak dilakukan, diantaranya; kalibrasi efisiensi puncak energi penuh pada detektor HPGe dan sumber [8], mengembangkan model detektor HPGe [9], investigasi pemodelan sudut/hybrid untuk menghitung efisiensi detektor HPGe pada puncak energi penuh absolut [10], eksperimen untuk penentuan efisiensi detektor HPGe [11].

LANDASAN TEORI

Radiasi Gamma

Radiasi dapat diartikan sebagai emisi energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dapat melalui ruang vakum dan dalam media suatu material. Radiasi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu radiasi pengion dan non pengion. Hal ini didasarkan pada kekuatannya dalam mengionisasi materi dan umumnya diberikan dalam unit elektron volt. Jenis sumber yang menghasilkan sumber radiasi gama diantaranya Cs-137 dan Co-60 [12].

Detektor High Purity Germanium (HPGe)

Detektor radiasi merupakan suatu alat yang peka terhadap radiasi, dan akan menghasilkan suatu respon tertentu. Detektor radiasi berfungsi untuk

menangkap radiasi dan mengubahnya menjadi sinyal atau pulsa listrik [3].

Detektor yang cocok digunakan pada spektroskopi sinar gamma adalah detektor germanium kemurnian tinggi (HPGe: *High Purity Germanium*) [4].

Cesium Iodide doped Thallium CsI(Tl)

Kristal CsI(Tl) memiliki struktur kubik dengan densitas sebesar 4.53 g/cm^3 dan nomor atom (Z) yang tinggi yaitu 54. Kristal ini memiliki stabilitas mekanik dan kimia yang tinggi dari sifat higroskopis. Pada prinsipnya, karakteristik dari kristal CsI(Tl) seperti pusat warna dan ketahanan resistansi radiasinya tergantung pada kemurnian dan kesempurnaan kristal [13].

Efisiensi Detektor

Efisiensi adalah suatu parameter yang sangat penting dalam pencacahan karena pulsa yang terekam menunjukkan rasio antara jumlah hitungan yang terdeteksi dipuncak dengan jumlah foton yang dipancarkan oleh sumber, setiap radiasi yang mengenai detektor akan diubah menjadi sebuah pulsa listrik dan akan dicatat sebagai cacahan [14]. Efisiensi detektor dapat ditentukan berdasarkan persamaan 1.

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{jumlah pulsa terekam}}{\text{jumlah kuantitas radiasi yang dipancarkan sumber}} \quad (1)$$

dengan ε_{abs} menunjukkan efisiensi absolut pada energi E dan jumlah radiasi yang dipancarkan atau aktivitas standar sumber radiasi gamma selama pengukuran dengan satuan Bq.

Software MCNP

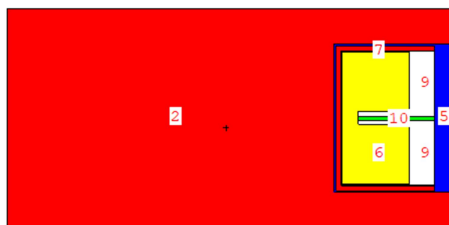
Monte Carlo N-Particle Extended Version (MCNP) yaitu versi baru dari MCNP dengan fitur tambahan dan kemampuan menyimulasikan proton. Metode monte carlo merupakan metode numerik statistik yang dipakai untuk menyelesaikan masalah yang tidak dimungkinkan diselesaikan secara analitik yaitu dengan menyimulasikan bilangan acak. MCNP merupakan piranti lunak yang diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel elektron, foton, neutron, proton, dan ion dengan rentang energi hingga orde GeV. Program MCNP 2.6. yang disusun oleh tim monte carlo di Laboratorium Nasional Los Alamos, USA [15].

METODE PENELITIAN

Prosedur penelitian diawali dengan membuat model geometri detektor, model pulsa cacahan, dan definisi sumber radiasi. Pada penelitian ini menggunakan sumber radiasi Cs-137 dan Co-60. *Input* sumber yang digunakan adalah sumber titik yang telah diatur sesuai jarak yang telah ditentukan. Jarak terbagi menjadi lima variasi yaitu 0,75 cm; 1,5 cm; 2,25 cm; 3 cm; 3,75 cm.

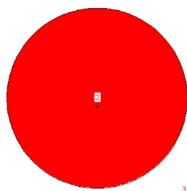
Teknik Pengambilan Data

Software visual editor atau yang biasa disebut dengan VISED, digunakan untuk menampilkan pemodelan detektor seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2 berupa skema dua dimensi detektor.



Gambar 1. Set-Up penelitian 2D dalam Visual Editor (XY).

Pada Gambar 1 terdapat udara (angka 2), aluminium *housing* (angka 5), *crystal* (angka 6), *crystal holder* (angka 7), *vakum well* (angka 9), dan tembaga (angka 10).



Gambar 2. Set-Up penelitian 2D dalam Visual Editor (ZY)

Model Pulsa Distribusi Energi

Penentuan besaran Fisika dalam penelitian ini menggunakan beberapa jenis tally (besaran yang dicari pada MCNP) diantaranya tally energi (pada *input* file diberi kode E8) dan tally pulsa untuk foton (pada *input* file diberi kode F8p). Tally E8 merupakan bin energi untuk menampilkan nilai cacahan pada rentang energi tertentu. Pada simulasi ini dibuat rentang energi dari 0 sampai dengan 2000 keV. Tally F8p akan memberikan keluaran MCNP berupa banyaknya cacahan hasil interaksi foton dengan kristal

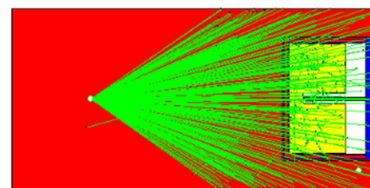
detektor. Batas akhir histori simulasi MCNP adalah 3×10^5 .

Running Program

Proses running MCNP dilakukan dengan menggunakan total commander yaitu dengan memanggil kode input MCNP “MCNP inp=fileinput.txt” Software visual editor atau yang biasa disebut dengan VISED, digunakan untuk menampilkan pemodelan detector. Partikel foton yang terdistribusi dalam detektor berjumlah 3×10^5 . Gambar 3. menampilkan partikel yang terdistribusi mengenai detektor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini geometri detektor mengikuti model GX-3519, p-type HPGe detector *manufactured by* CANBERRA. Geometri terdiri dari *electrode window*, tembaga, *crystal*, *vaccum well* dan *housing* [7]. Pada saat radiasi gamma masuk kedalam detektor dan berinteraksi di wilayah kristal, maka akan membentuk pasangan-pasangan elektron-hole, Pada saat diberi tegangan tinggi maka mengakibatkan elektron bergerak ke arah positif, hole bergerak ke arah negatif sehingga pada daerah tersebut didapatkan daerah bersih. Daerah bersih merupakan daerah yang sangat sensitif terhadap arus. Jika radiasi gamma masuk, maka radiasi tersebut akan mengeksitasi daerah bersih sehingga terjadi rekombinasi kemudian muncul arus. Semakin banyak radiasi yang dipancarkan maka rekombinasi juga akan semakin banyak. Jumlah pasangan muatan yang dihasilkan sebanding dengan energi yang disimpan oleh foton.



Gambar 3. Particle tracks menggunakan VISED

Partikel foton yang terdistribusi dalam detektor berjumlah. Seperti pada Gambar 3. *Particle tracks* menggunakan VISED, menampilkan partikel yang terdistribusi mengenai detektor.

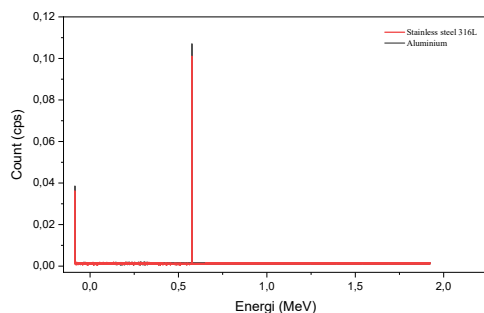
Kristal yang digunakan pada penelitian ini adalah *purity high germanium* (HPGe) dan *cesium iodide doped thalium* atau CsI(Tl) yang masing-masing memiliki massa jenis 5,323

g/cm^3 dan $4,51 \text{ g/cm}^3$. Kristal ini yang akan menyerap sumber radiasi yang dipancarkan dengan energi tertentu.

Efisiensi detektor HPGe dan CsI(Tl)

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan program MCNP dihasilkan efisiensi detektor HPGe dengan *housing* aluminium sebesar $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan CsI(Tl) sebesar $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$. Hasil ini diperoleh sesuai sumber yang digunakan yaitu Cs-137 pada energi 0,662 MeV. Sedangkan untuk detektor HPGe dan CsI(Tl) dengan *housing* *stainless steel* berturut-turut adalah $(1,993 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan $(1,974 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$.

Berdasarkan simulasi MCNP dan kemudian menghitung nilai efisiensinya, diperoleh perbedaan antara sumber radiasi Cs-137 yang besarnya 0,662 MeV dengan Co-60 yang besarnya 1,173 MeV. Nilai efisiensi lebih tinggi pada saat menggunakan sumber dengan energi 0,662 yaitu sebesar $1,995 \times 10^{-2} \%$. Sedangkan untuk penggunaan sumber Co-60 efisiensinya menurun menjadi $0,693 \times 10^{-2} \%$. Hal ini membuktikan bahwa besarnya sumber energi radiasi yang dipancarkan menghasilkan efisiensi yang makin kecil, jika energi yang digunakan besar.



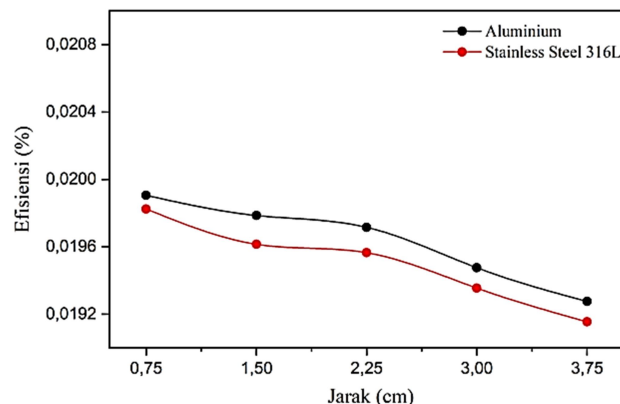
Gambar 4. Perbandingan spektrum kristal CsI(Tl) *housing* aluminium dengan *stainless steel* 316L

Berdasarkan simulasi diperoleh nilai efisiensi model detektor tanpa *housing* adalah $(2,712 \pm 0,39) \times 10^{-2} \%$, sedangkan pada saat ditambahkan *housing* aluminium dan *stainless steel* berturut-turut efisiensi detektor HPGe bernilai $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan $(1,993 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$.

Pengaruh Variasi Jarak terhadap Efisiensi Detektor

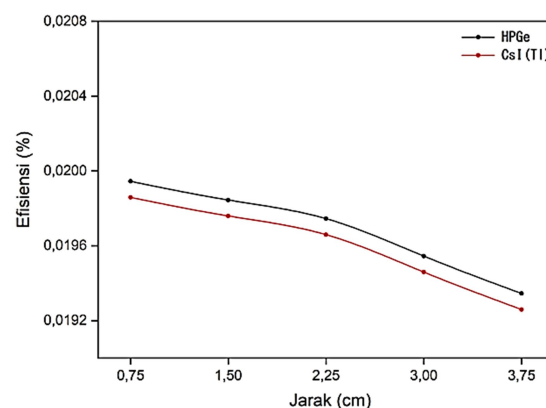
Faktor yang mempengaruhi efisiensi detektor selanjutnya adalah jarak sumber radiasi ke

detektor. Pada penelitian ini nilai efisiensi detektor pada variasi jarak sumber ke detektor diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan efisiensi detektor HPGe terhadap jarak sumber-detektor

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa nilai efisiensi paling tinggi diperoleh pada saat jarak 0,75 cm yaitu jarak yang paling dekat dengan detektor. Hal ini dapat diartikan bahwa posisi tersebut adalah posisi yang sesuai untuk mendapatkan efisiensi detektor yang maksimal. Efisiensi detektor akan naik pada saat sumber tepat dekat dengan detektor. Makin dekat jarak sumber radiasi dengan detektor sehingga efisiensi makin meningkat. Efisiensi detektor menurun pada jarak sumber yang semakin jauh dengan detektor. Hal ini dikarenakan jumlah sinar gamma yang mengenai detector berkurang akibat interaksi sinar gamma pada materi lingkungan di luar detektor [1].



Gambar 6. Grafik efisiensi detektor HPGe dan CsI(Tl) dengan *housing* aluminium

Hasil simulasi menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori. Kurva efisiensi terlihat lebih tinggi pada jarak yang lebih dekat dengan detektor. Artinya, semakin dekat jarak sumber

ke detektor maka efisiensi juga semakin tinggi. Pada Gambar 6. menjelaskan bahwa pada jarak yang diatur sama, detektor HPGe memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan CsI(Tl).

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa detektor yang memiliki kinerja lebih baik adalah detektor dengan kristal germanium. Nilai efisiensi terbaik detektor HPGe dan CsI(Tl) berturut-turut adalah $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ dan $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ untuk housing aluminium. Material aluminium memiliki densitas yang lebih ringan dibandingkan dengan *stainless steel*. Dengan densitas yang lebih kecil maka foton menjadi lebih mudah menembus material mengakibatkan probabilitas interaksinya dengan foton menjadi lebih besar. Sehingga efisiensi dengan housing aluminium lebih tinggi dibandingkan dengan housing *stainless steel*. Sehingga penggunaan aluminium lebih disarankan sebagai housing detektor dan efisiensi paling baik adalah pada kondisi jarak sumber radiasi semakin dekat dengan detektor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Ngurah Ayu Ketut Umiati, S.Si., M.Si, dan Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si yang telah membimbing dan memberikan saran-saran dalam proses penelitian ini sehingga selesai dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Oktajianto, H., Setiawati, E., & Richardina V. 2015. Gamma Spectroscopy Response Analysis of Bismuth Germanium Oxide (Bgo) and Nai (Tl) Detector To Determine the Detector Efficiency Using the Monte Carlo MCNP Method. *Jurnal Sains Dan Matematika*, 23(2), 39–42.
- [2] Tursinah, R., Sukmabuana, P., dan Laksono, T.C. 2016. Simulasi Monte Carlo untuk Pengukuran Radioaktivitas Tanah Dengan Spektrometer Gamma in-Situ Terkolimasi. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir*. ISBN 978-979-17109-9-2.
- [3] Britt, C., Wen, X., Qi, H., dan Hayward, J. P. 2021. Directionality for wearable, closely packed radiation detector arrays. *Nuclear Instruments and Methods in PhysCs Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 986 (2021) 16470.
- [4] Britton, R., Burnet, J., Davies, A., dan Regan, P. H. 2013. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations. *J Radioanal Nucl Chem* 295, 2035–2041.
- [5] Fabjan, C. W. dan Schopper, H., 2020. *Particle PhysCs Reference Library. Detector for Particles and Radiation*, Springer, ISBN 978-3-030-35318-6.
- [6] Khan, W., Zhang, C. H. Q., dan Cao, Y. 2019. Design of CsI (TI) detector system to search for lost radioactive source. *Nuclear Science and Techniques*, 30(9), 1–9.
- [7] Azbouche, A., Belamri, M., dan Tchakoua, T. 2018. Study of the germanium dead layer influence on HP (Ge) detector efficiency by Monte Carlo simulation. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2(2), 1–6.
- [8] Agarwal, C., Chaudhury, S., Goswami, A., dan Gathibandhe, M. 2011. Full energy peak efficiency calibration of HPGe detector for point and extended sources using Monte Carlo code. *J Radioanal Nucl Chem*, 287, 701–708.
- [9] Haj-heidari, M. T., Safari, M. J., Afarideh, H., dan Rouhi, H. 2016. Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes. *Radiation Measurements*, 88, 1–6.
- [10] Salman, A., Ahmed, Z., Allam, K. A., dan El-sharkawy, S. 2019. Investigation hybrid MCNP/Angle model for calculating the absolute full-energy peak efficiency of HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 150, 57–62.
- [11] Jeřkovský, M., Javorník, A., Breier, R., Slučiak, J., dan Povinec, P. P. 2019. Experimental and Monte Carlo determination of HPGe detector efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(3), 1863–1869.
- [12] Al-okour, A. 2021. Radiation Physics : Radiation interaction with matter. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.

- [13] Saengkaew, P., Sanorpim, S., dan Jitpukdee, M. 2016. Impact of precursor purity on optical properties and radiation detection of CsI: Tl scintillators. *Applied Physics A*, 122(8), 1–7.
- [14] Sacay, E. M. 2014. *Monte Carlo Calculated Efficiency Curve Investigation for the Ontario Power Generation Moving Bed Whole Body Counter. Master of Applied Science in Nuclear Engineering.*
- [15] Pelowitz, D. B. 2011. *MCNP Tm User ' S Manual* Version 2.6.0, April 2008 LA-CP-07-1473.