

PENENTUAN KETEBALAN DEAD LAYER DETEKTOR HPGe MELALUI SIMULASI DAN PENGUKURAN KURVA KALIBRASI EFISIENSI UNTUK ANALISIS LIMBAH RADIOAKTIF PEMANCAR GAMMA

Nurokhim

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - BATAN

Email: nurokhim@batan.go.id

ABSTRAK

PENENTUAN KETEBALAN DEAD LAYER DETEKTOR HPGe MELALUI SIMULASI DAN PENGUKURAN KURVA KALIBRASI EFISIENSI UNTUK ANALISIS LIMBAH RADIOAKTIF PEMANCAR GAMMA. Ketebalan *dead layer* detektor HPGe merupakan parameter yang sangat penting untuk menentukan efisiensi kalibrasi pada analisis kandungan radionuklida dalam limbah radioaktif. Namun demikian informasi ketebalan ini tidak mudah diperoleh, data dari pabrik pembuat detektor umumnya tidak akurat, dan ketebalan *dead layer* berubah seiring dengan lama pemakaian detektor. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan ketebalan *dead layer* detektor HPGe GC2020 yang telah digunakan rutin di laboratorium. Penentuan dilakukan dengan membandingkan kurva kalibrasi hasil pengukuran di laboratorium dengan hasil perhitungan program MCNP5. Di laboratorium kurva kalibrasi dibuat dengan melakukan pencacahan radionuklida-radionuklida standar Cd-109, Co-60, Cs-137, Mn-54, dan Co-60 yang diletakkan pada posisi 0, 7,5 dan 15 cm dari permukaan detektor. Kurva yang sama dibuat secara simulasi dengan menghitung efisiensi tiap energi radionuklida berdasarkan data konfigurasi detektor-sumber dengan variasi tebal *dead layer* 1 - 2 mm. Dapat disimpulkan bahwa tebal *dead layer* adalah 1,50 mm dengan penyimpangan kurva simulasi terhadap pengukuran kurang dari 8% pada rentang energi 80 - 1400 keV.

Kata kunci: *dead layer*, HPGe, simulasi, efisiensi, kalibrasi, limbah radioaktif.

ABSTRACT

DETERMINATION OF DEAD LAYER THICKNESS OF HPGe DETECTOR THROUGH SIMULATION AND MEASUREMENT OF EFFICIENCY CALIBRATION CURVE FOR RADIOACTIVE WASTE ANALYSIS OF GAMMA TRANSMITTER. *Dead layer thickness of HPGe detector is a very important parameter for determining the efficiency of the calibration on the analysis of radionuclide content in radioactive waste. However, information of this thickness is not easily obtained, the data from the detector's manufacturers are generally not accurate, and the dead layer thickness is changed together with the long of time of detector usage. This study was conducted to determine the thickness of deadlayer HPGe GC2020 detector which has been used routinely in the laboratory. The determination is done by comparing the results of the calibration curve from measurements in the laboratory with calculation result of MCNP5 program. In the laboratory, the calibration curve is made by measuring of radionuclides standard Cd-109, Co-60, Cs-137, Mn-54 and Co-60 that is placed at position 0, 7.5 and 15 cm from the detector surface. The same curve made in simulation manner by calculating the energy efficiency of each radionuclide based on data detector-source configuration with a dead layer thickness variations of 1-2 mm. It can be concluded that the dead layer thickness was 1.50 mm with a deviation of the simulated curve measurement is less than 8% in the energy range 80-1400 keV.*

Keywords: *dead layer*, HPGe, simulation, efficiency, calibration, radioactive waste.

PENDAHULUAN

Detektor *germanium* kemurnian tinggi (HPGe: *High Pure Germanium*) banyak digunakan di laboratorium. Detektor HPGe sangat berguna dalam karakterisasi untuk menentukan kandungan

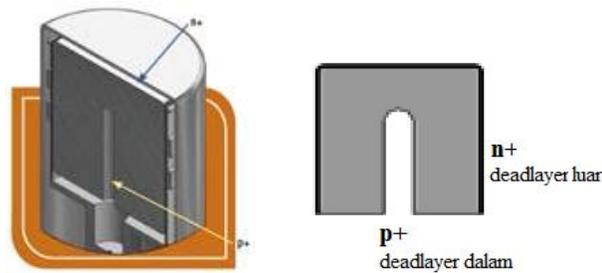
berbagai radionuklida dalam limbah radioaktif. Detektor HPGe jugasangat penting dalam analisis radionuklida di berbagai sampel pemantauan lingkungan, baik di tanah, air, udara, maupun mahluk hidup. Resolusinya yang sangat baik serta efisiensinya yang cukup tinggi memungkinkan detektor HPGe dapat digunakan untuk analisis kualitatif maupun kuantitatif berbagai radionuklida dalam sampel. Dengan kemampuan tersebut maka berbagai jenis radionuklida pemancar gamma dalam limbah radioaktif maupun sampel lingkungan dapat dideteksi dan ditentukan radioaktivitasnya.

Ketelitian detektor HPGe dalam analisis kuantitatif sangat ditentukan oleh efisiensi detektor. Secara konvensional penentuan efisiensi dilakukan melalui kalibrasi langsung dengan menentukan respon detektor terhadap berbagai energi gamma, menggunakan sumber standar yang diketahui aktivitasnya, biasanya berupa larutan standar yang berisi satu atau beberapa radioisotop. Efisiensi dihitung pada berbagai energi gamma yang muncul, kemudian diekstrapolasi dalam rentang energi yang terdeteksi untuk menghasilkan kurva efisiensi. Selanjutnya kurva efisiensi digunakan untuk menghitung aktivitas radioisotop dalam sampel yang energi radiasi gammanya boleh jadi tidak berpartisipasi dalam menghasilkan kurva kalibrasi [1]. Pendekatan ini praktis, namun kurang akurat dan presisi, terutama untuk sampel-sampel yang kompleks geometri atau komposisinya, pembuatan standar yang sesuai memerlukan banyak biaya, waktu dan menimbulkan banyak limbah radioaktif [2]. Di fasilitas pengelolaan limbah radioaktif sampel dapat berupa kontener sesungguhnya seperti sel dan drum limbah, tangki penyimpan limbah, kolom resin dsb., atau dapat berupa spesimen dalam berbagai bentuk misalnya sampel cairan dalam marineli, botol dsb., atau spesimen padat potongan pipa, bahan bakar bekas dan sebagainya. Dalam hal ini pembuatan standar melalui simulasi menggunakan program komputer merupakan pilihan terbaik, standar yang benar-benar mirip dengan sampel yang akan diukur dapat dibuat secara simulasi.

Penentuan efisiensi detektor secara simulasi menggunakan perangkat lunak telah banyak dikembangkan. Banyak program yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi perhitungan efisiensi, salah satunya adalah program *Monte Carlo N-Particle* versi ke-5 (MCNP5). Program MCNP5 dapat digunakan untuk simulasi mengikuti jejak partikel atau foton dari posisi lahir sampai diserap oleh material di sekitarnya atau hilang dari sistem [3]. Dengan menyusun konfigurasi detektor-sumber yang sesuai maka simulasi perhitungan efisiensi dapat dilakukan. Penggunaan perangkat lunak untuk kalibrasi efisiensi detektor walaupun tidak sepenuhnya dapat menggantikan kalibrasi di laboratorium namun akan mengurangi ketergantungan terhadap jumlah sumber standar, menghemat waktu untuk proses preparasi dan kalibrasi, dan fleksibel untuk mengantisipasi sampel-sampel yang mempunyai geometri dan komposisi material berbeda dengan sumber standar. Apabila geometri dan komposisi material detektor-sumber telah diperoleh dengan akurat maka perubahan geometri dan komposisi sampel dapat ditiru dengan simulasi.

Dalam penentuan efisiensi detektor melalui simulasi, spesifikasi geometri material detektor-sumber merupakan hal yang sangat penting, akurasi geometri dan komposisi material sangat menentukan hasil perhitungan. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa komponen yang paling sensitif mempengaruhi hasil perhitungan adalah dimensi kristal dan *dead layer* [4]. VARGAS dan kawan-kawan mendapatkan bahwa efisiensi berubah signifikan dengan dimater dan posisi kristal [5,6]. KAMBOJ dan KAHN menyatakan bahwa volume kristal dan bukan hanya diameter dan panjang kristal yang terutama mempengaruhi efisiensi [7]. Sementara itu RODENAS dan kawan-kawan menyatakan bahwa kenaikan tebal *dead layer* membuat penurunan efisiensi detektor tidak hanya karena atenuasi sinar gamma dalam *dead layer* tetapi juga karena reduksi volume aktif detektor [8]. Sedangkan BOCHUD dan kawan-kawan menemukan bahwa terkait dengan diameter dan panjang kristal di situ terdapat *dead layer* di bagian permukaan detektor yang berpengaruh besar terhadap efisiensi detektor [9].

Dead layer adalah bagian kristal germanium yang tidak responsif terhadap radiasi yang datang. Pada detektor koaksial HPGe tipe standar (SEGe: *Standard Electrode Coaxial Germanium*) kristal germanium mempunyai bentuk silinder dengan kontak tipe-n pada bagian luar dan tipe-p di permukaan lubang dalam (Gambar 1). Kontak tipe-n dan tipe-p merupakan lapisan tipis yang dibuat dengan teknik difusi litium dan implantasi boron. Kontak tipe n merupakan *dead layer* depan yang berhadapan langsung dengan sumber radiasi sedang kontak tipe-p merupakan *dead layer* dalam. Tebal masing-masing *dead layer* menurut spesifikasi pabrik adalah 0.5 mm dan 0.3 μ m [10], namun demikian banyak penelitian menunjukkan bahwa angka ketebalan ini tidak akurat dan berubah seiring dengan lama pemakaian detektor.



Gambar 1. Kristal detektor Germanium [10]

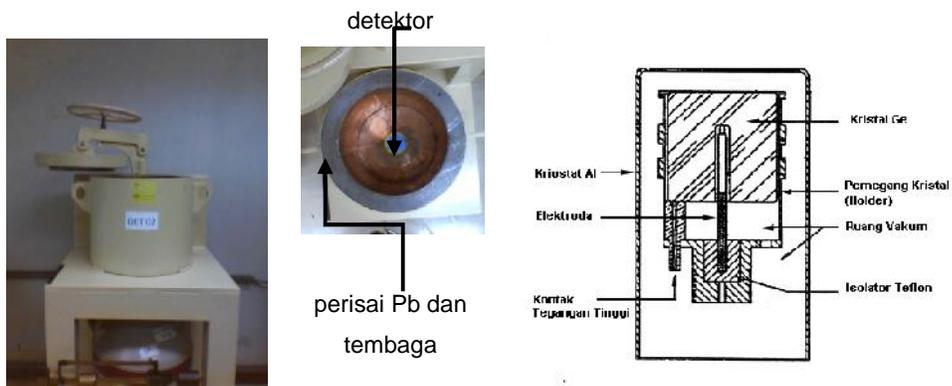
Makalah ini menguraikan proses penentuan ketebalan *dead layer* detektor HPGe GC2020, dimana parameter fisik detektor lainnya seperti ukuran kristal, aluminium pemegang kristal dan *cryostat* telah diketahui dengan baik. Diuraikan proses pembuatan kurva kalibrasi dari pengukuran serta kalibrasi dari simulasi program MCNP5. Analisis perbandingan kurva kalibrasi hasil simulasi terhadap pengukuran digunakan untuk menentukan ketebalan *dead layer*.

TATA KERJA

Alat dan Bahan:

Penentuan efisiensi detektor di laboratorium dilakukan dengan mengukur sumber standar menggunakan perangkat detektor HPGe GC2020 buatan Canberra dalam perisai timbal seperti Gambar 2. Detektor dihubungkan dengan perangkat suplai tegangan tinggi HVDC, *Amplifier* penguat sinyal serta *Multi Channel Analyzer (MCA) multi port* yang dioperasikan dengan program GENIE 2000 untuk merekam spektrum pencacahan. Pencacahan untuk kalibrasi menggunakan 5 buah sumber titik; Cd-109, Co-57, Cs-137, Mn-54 dan Co-60 buatan NIST (*National Institute of Standards and Technology*) dengan aktivitas sumber masing-masing 1 μCi pada tanggal 18 Oktober 2006.

Simulasi untuk menentukan efisiensi detektor pada berbagai tebal *dead layer* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MCNP5, menggunakan data-data spesifikasi dan ukuran dimensi detektor seperti Tabel 1. Antar muka untuk mendesain dan memasukkan data-data input menggunakan program Visual Editor (VISED) 5.4. Sedangkan untuk mempermudah analisa data, pembuatan dan analisis perbandingan kurva efisiensi digunakan perangkat lunak MATLAB 7.8.



Gambar 2. Bentuk fisik dan spesifikasi bagian dalam detektor HPGe GC2020.[4,11]

Tabel 1. Parameter fisik geometri dan material detektor [4,11].

Material/Komponen (kerapatan)	Dimensi (mm)
Kristal Germanium (5,323 g/cm ³)	
Diameter luar	61,5
Tinggi	35,5
Diameter lubang (<i>hole</i>)	10
Kedalaman lubang	15
<i>Dead layer</i> Luar	0,5 - 0,75
<i>Dead layer</i> Dalam (<i>hole</i>)	0,003 - 0.005
Aluminium pemegang kristal (2,71 g/cm ³):	
Diameter	64,5
Tinggi	20
Tebal samping	1
Tebal bawah	3
Aluminium <i>Cryostat</i> (2.71 g/cm ³)::	
Diameter	76
Tinggi	100
Tebal	1,5
Window (hampa)	
Tebal	1,5
Jarak window-kristal	5
Perisai Timbal (11.34 g/cm ³) & Tembaga (8.96 g/cm ³)	
Diameter luar	42,5
Tinggi	40
Tebal dinding	5,3
Tebal tutup	6,8
Tebal bawah	4,8
Tebal Lapisan dalam (tembaga)	2

Prosedur

Penentuan efisiensi detektor secara ekperimental dilakukan dengan melakukan pencacahan 5 buah sumber standar titik menggunakan detektor HPGe di laboratorium. Setiap sumber standar di cacah untuk arah vertikal dengan posisi 0, 7.5 dan 15 cm dari permukaan detektor.

Kurva efisiensi detektor pada berbagai posisi dibuat dengan menentukan efisiensi *photo peak* pencacahan pada tiap energi yang muncul dalam spektrum. Efisiensi *photo peak* (ϵ) tiap energi dihitung menggunakan persamaan [12]:

$$\epsilon(E) = \frac{S}{T_1 y A K_w U_f} \quad (1)$$

dimana $\epsilon(E)$ adalah efisiensi *photo peak* pada energi E, S adalah luas neto *photo peak*, T_1 adalah lama pencacahan, y adalah rasio terbentuknya radiasi gamma atau *yield* radionuklida pada energi E, A adalah aktivitas radionuklida standar pada spesifikasi/referensi pabrik (18 Oktober 2006), U_f adalah faktor konversi satuan aktivitas A ke satuan Bq (jika diperlukan), dan K_w adalah faktor koreksi peluruhan aktivitas A dari spesifikasi/referensi sampai saat dimulai pencacahan, yaitu:

$$K_w = e^{-\frac{\ln(2) t_w}{T_{1/2}}} \quad (2)$$

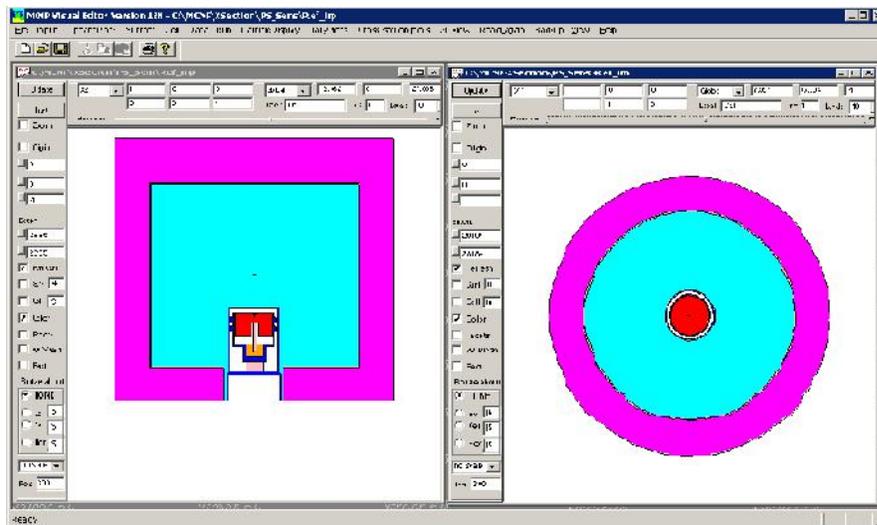
dimana t_w adalah lama peluruhan sumber kalibrasi dari 18 Oktober 2006 sampai saat mulai pencacahan dan $T_{1/2}$ adalah umur paro radionuklida standar kalibrasi.

Besaran probabilitas/rasio pembentukan radiasi gamma atau *Yield* energi gamma tiap radionuklida dapat dilihat dalam referensi data standar peluruhan radiasi gamma dari IAEA [13]. Besarnya Umur paro, energi serta *yield* dari kelima radionuklida seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik radiasi radionuklida sumber standar. [13]

Radionuklida	$T_{1/2}$ (hari)	E (keV)	<i>Yield</i>
Cd-109	461,40	88,034	0,0363
Co-57	271,80	12,061 136,474	0,8551 0,1071
Cs-137	11019,35	661,657	0,8499
Mn-54	312,29	834,838	0,9997
Co-60	1925,23	1173,228 1332,492	0,9985 0,9998

Perhitungan efisiensi detektor secara simulasi dibuat dengan memasukkan data-data parameter fisik geometri dan material detektor (Tabel 1) dalam program *visual editor* (VISED) yang ada dalam MCNP5. Spesifikasi ukuran detektor digunakan untuk mendefinisikan batasan-batasan permukaan (*surface*), membentuk sel (*cell*) serta melakukan pengesetan jenis material tiap sel, sehingga akan mensimulasi bentuk geometri detektor beserta perisai, seperti tampak pada Gambar 3. Perhitungan efisiensi detektor tiap energi dan posisi sumber dilakukan dengan melakukan pengesetan kartu *tally* (kode penghitung) perhitungan distribusi pulsa energi yang terbentuk dalam sel detektor yaitu kartu *tally* F8 untuk partikel atau jenis sumber radiasi foton dan atau elektron. Kemudian *tally* energi E_n diisi dengan energi *binds* atau *slot* inkremen mendekati angka resolusi detektor. Perhitungan efisiensi dilakukan dengan mengeset sumber radiasi dengan satu juta foton gamma pada posisi *point source*, kemudian menjalankan program sehingga diperoleh besaran efisiensi yang merupakan hasil normalisasi banyaknya foton yang terdeteksi dalam sel detektor terhadap sumber.



Gambar 3. Model detektor HPGe GC2020 dalam Vised MCNP5 [4]

Perhitungan efisiensi detektor untuk simulasi dilakukan dengan variasi tebal *dead layer* 1, 1,25, 1,5, 1,75 dan 2 mm. Untuk setiap ketebalan *dead layer* dihitung besar efisiensi tiap energi gamma yang ada di Tabel 2 pada posisi 0, 7,5 dan 15 cm dari permukaan detektor.

Analisis dilakukan dengan membuat kurva kalibrasi efisiensi untuk berbagai ketebalan *dead layer* dan posisi sumber radiasi, kemudian membandingkannya dengan kurva kalibrasi dari hasil pengukuran di laboratorium. Dengan menggunakan *curve fitting* maka kurva kalibrasi efisiensi dapat dinyatakan dengan fungsi polinomial:

$$\ln(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n b_i \cdot (\ln(E))^i \quad (3)$$

Dimana b_i adalah koefisien polinomial yang dapat ditentukan melalui perhitungan, ε adalah efisiensi *photo peak*, dan E energi *photo peak*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3 memperlihatkan data hasil perhitungan efisiensi pengukuran di laboratorium dan hasil perhitungan simulasi dengan MCNP5 untuk *dead layer* 1 mm pada tiga posisi sumber titik yaitu 0, 7,5 dan 15 cm dari permukaan detektor. Deviasi efisiensi simulasi terhadap pengukuran laboratorium yang besar dan bernilai positif menunjukkan bahwa efisiensi hasil perhitungan MCNP5 jauh lebih besar dari nilai pengukuran di laboratorium. Dari data tersebut juga menunjukkan bahwa penggunaan spesifikasi tebal *dead layer* dari pabrik pembuat detektor tidak sesuai dan mengakibatkan efisiensi yang diperoleh dari perhitungan jauh lebih besar dari yang sebenarnya.

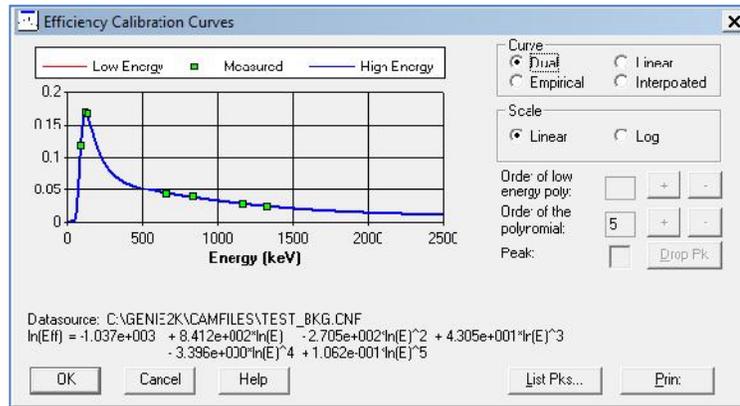
Tabel 3. Data pengukuran dan simulasi Efisiensi detektor untuk *dead layer* 1 mm.

Ey (keV)	Pengukuran LAB			MCNP5			Deviasi Efisiensi (%)		
	0	7,5	15	0	7,5	15	0	7,5	15
88.03	1,17E-01	1,18E-02	3,69E-03	1,50E-01	1,52E-02	4,70E-03	27,56	29,16	27,32
122.06	1,68E-01	1,56E-02	4,90E-03	1,94E-01	1,76E-02	5,52E-03	15,52	13,34	12,59
136.47	1,67E-01	1,58E-02	4,86E-03	1,95E-01	1,74E-02	5,46E-03	17,07	10,16	12,23
661.66	4,23E-02	3,90E-03	1,29E-03	5,19E-02	4,37E-03	1,45E-03	22,50	12,12	11,93
834.84	3,70E-02	3,17E-03	1,06E-03	4,21E-02	3,57E-03	1,16E-03	13,57	12,36	9,87
1173.23	2,16E-02	2,34E-03	7,67E-04	3,11E-02	2,62E-03	8,63E-04	44,13	11,92	12,46
1332.49	1,91E-02	2,09E-03	6,94E-04	2,79E-02	2,32E-03	7,43E-04	46,06	10,90	7,08

Kurva kalibrasi efisiensi untuk posisi 0 cm dengan *curve fitting* polinomial pangkat 5 menggunakan GENIE 2000 diperoleh persamaan kalibrasi:

$$\ln(\varepsilon) = -1037 + 841,2 \ln(E) - 270,5 \ln(E)^2 + 43,05 \ln(E)^3 - 3,396 \ln(E)^4 + 0,1062 \ln(E)^5 \quad (4)$$

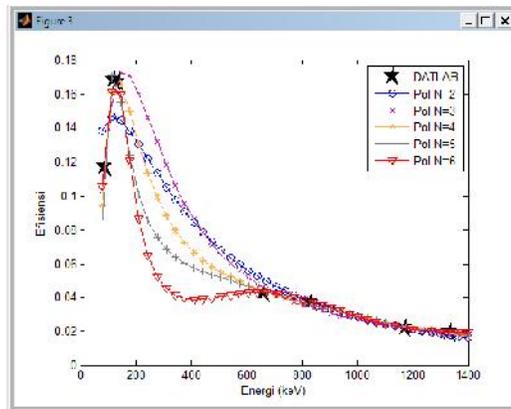
Pangkat polinomial dapat dipilih dan persamaan kurva dapat ditampilkan dalam bentuk: linier, empirik atau terinterpolasi; seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



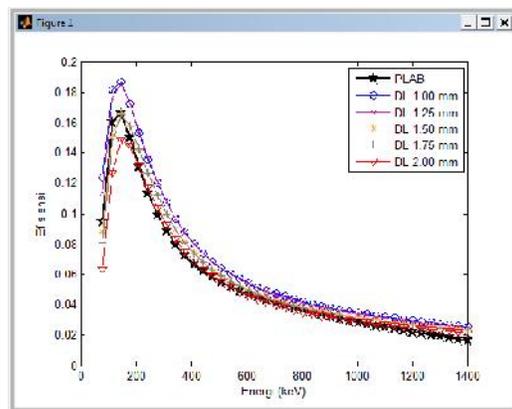
Gambar 4. Kurva Kalibrasi dalam GENIE 2000

Kurva yang sama juga bisa didapat dengan melakukan *fitting* data menggunakan fungsi **polyfit** dan **polyval** pada MATLAB. Dengan menggunakan fungsi **log** (logaritma alam) dilakukan *fitting* data $\log(\epsilon)$ terhadap $\log(E)$ maka koefisien-koefisien persamaan (4) bisa didapatkan, dan selanjutnya besaran efisiensi sebagai fungsi energi dapat diperoleh melalui nilai eksponensial dari masing-masing parameter.

Pemilihan nilai pangkat polinomial sangat mempengaruhi bentuk kurva efisiensi. Gambar 5 memperlihatkan pengaruh pengambilan nilai pangkat polinomial (N) untuk data pengukuran laboratorium pada posisi sumber di permukaan detektor. Kurangnya data pengukuran pada energi 122 – 661 keV membuat daerah energi tersebut tidak terinterpolasi dengan baik. Dari gambar tersebut terlihat bahwa polinomial pangkat 3 dan 4 merupakan pendekatan terbaik untuk kurva kalibrasi.



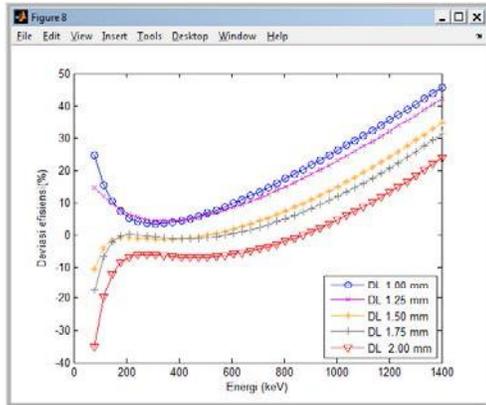
Gambar 5. Pengaruh pangkat polinomial (N) terhadap bentuk kurva efisiensi



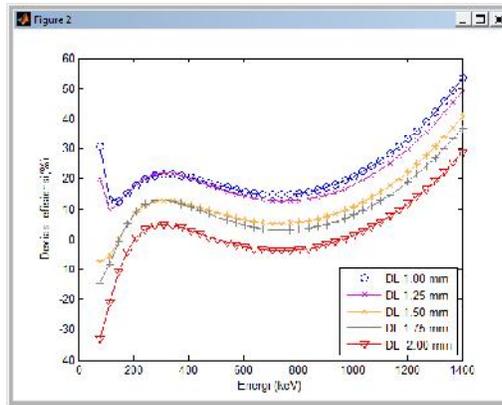
Gambar 6. Kurva Efisiensi pengukuran (PLAB) dan simulasi MCNP5, N=4.

Gambar 6 memperlihatkan kurva efisiensi hasil pengukuran di laboratorium (PLAB) dan simulasi untuk tebal *dead layer* (DL) 1, 1,25, 1,5, 1,75 dan 2 mm pada posisi sumber radiasi di permukaan detektor. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk tebal DL 1 dan 1,25 mm efisiensi perhitungan MCNP5 masih jauh lebih besar dari pengukuran di laboratorium. Semakin tebal *dead layer* kurva semakin mendekati hasil pengukuran. Persentase deviasi perhitungan MCNP5 terhadap pengukuran untuk *fitting* dengan polinomial pangkat 3 dan pangkat 4 seperti terlihat pada Gambar 7 dan 8. Dari ke dua gambar tersebut terlihat bahwa ketebalan DL 1-2 mm secara keseluruhan tidak ada yang memenuhi deviasi < 10% untuk seluruh rentang energi 80-1400 keV. Di kedua gambar, hampir di semua ketebalan *dead layer* deviasi yang besar terjadi pada

energi tinggi diatas 1000 keV, hal ini kemungkinan terjadi karena pengaruh penjumlahan koinciden (*coincidence summing*) pencacahan Co-60 di laboratorium, dimana Co-60 ini termasuk radionuklida yang berpotensi kuat menghasilkan penjumlahan bertingkat (*cascade summing*) atau *true coincidence summing* (TCS) dari dua energi gamma [14]. Pada pencacahan sumber radiasi di permukaan detektor, efisiensi detektor maksimum, maka dengan aktivitas sumber Co-60 yang cukup besar kemungkinan terjadinya penjumlahan *cascade* antara energi 1173,228 dengan 1332,492 keV juga cukup besar[15]. Walaupun demikian meskipun semua kurva menunjukkan deviasi yang besar, secara visual dari Gambar 7 dan 8 terlihat bahwa *dead layer* (DL) 1,5 dan 1,75 mm cenderung lebih di pilih di banding tiga kurva lainnya.

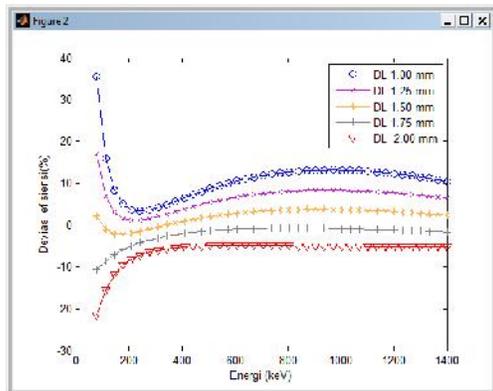


Gambar 7. Deviasi efisiensi MCNP5 terhadap pengukuran, N=3

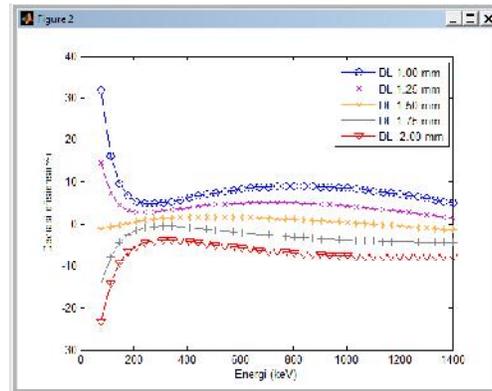


Gambar 8. Deviasi Efisiensi MCNP terhadap pengukuran, N=4

Gambar 9 dan 10 memperlihatkan deviasi kurva simulasi terhadap pengukuran untuk posisi pengukuran 7,5 dan 15 cm dari permukaan detektor menggunakan polinomial pangkat 3. Dari kedua kurva tersebut tampak kurva dengan DL 1,5 mm merupakan kurva yang paling mendekati dengan kurva hasil pengukuran laboratorium. Pada Gambar 9, empat kurva dengan DL ≥ 1.25 mempunyai deviasi $< 10\%$ untuk energi > 200 keV dan pada Gambar 10 semua kurva mempunyai deviasi $< 10\%$ untuk energi > 150 keV. Sedangkan untuk DL 1,5 mm, pada rentang energi 80-1400 deviasinya hanya berkisar antara -2,27% pada 146 keV sampai 3,79% pada 905 keV (Gambar 9) dan antara -1,34 % pada 1400 keV sampai 1,70 % pada 476-509 keV (Gambar 10). Dengan demikian deviasi maksimum untuk *dead layer* 1,5 mm sebesar 3,79 dan 1,70 % untuk posisi sumber 7,5 dan 15 cm.



Gambar 9. Deviasi kurva simulasi terhadap Pengukuran, jarak sumber 7.5 cm



Gambar 10. Deviasi kurva simulasi terhadap pengukuran, jarak sumber 15 cm

Tabel 4 merupakan rangkuman nilai maksimum deviasi kurva efisiensi terhadap pengukuran laboratorium untuk *dead layer* 1,25, 1,5 dan 1,75 mm dengan pendekatan polinomial pangkat 2, 3, 4 dan 5. Seperti telah diuraikan diatas untuk pengukuran di permukaan detektor (posisi 0 cm) kemungkinan efek koinsiden membuat deviasi sangat besar, walaupun secara visual berdasarkan kurva deviasi dengan *dead layer* 1,5 mm menempati posisi yang baik dibanding kurva lainnya namun belum dapat digunakan untuk menetapkan besarnya ketebalan *dead layer*. Dari tabel dapat dilihat bahwa pada posisi sumber 7,5 dan 15 cm simulasi perhitungan dengan tebal *dead layer* 1,5 mm memberikan deviasi yang kecil, jauh dibawah deviasi untuk tebal *dead layer* 1,25 dan 1,75 mm yang rata-rata menyimpang > 10%. Dengan mengacu tabel tersebut maka ketebalan *dead layer* yang paling cocok adalah 1,5 mm dengan deviasi < 4% jika dipilih polinomial yang tepat pangkat 3 atau < 8% untuk seluruh kemungkinan pemilihan pangkat polinomial. Hasil ini sebanding dengan hasil investigasi yang diperoleh oleh BOSON dkk. [16] dan NGO QUANG HUY [17,18] yang mendapatkan tebal *dead layer* pada detektor GC1518 sebesar 1,15 mm pada tahun 2005 dan menjadi 1,46 mm pada tahun 2009..

Tabel 4. Deviasi maksimum kurva efisiensi simulasi terhadap pengukuran.

Posisi sumber (cm)	Tebal <i>Dead layer</i> (mm)	Maksimum Deviasi untuk rentang energi 80-1400 keV (%)			
		Polinomial pangkat 2	Polinomial pangkat 3	Polinomial pangkat 4	Polinomial pangkat 5
0	1,25	38,77	42,13	49,47	44,67
	1,50	28,97	34,66	40,76	41,28
	1,75	24,03	31,17	36,76	32,80
7,5	1,25	10,68	17,03	16,8	18,57
	1,50	3,94	3,79	4,30	4,27
	1,75	11,11	10,65	11,37	10,20
15	1,25	9,78	14,50	16,69	20,07
	1,50	1,87	1,70	6,46	7,70
	1,75	11,92	14,28	13,54	11,56

KESIMPULAN

Efisiensi sumber titik dari pengukuran yang sangat dekat dengan detektor tidak dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam menentukan ketebalan *dead layer* karena deviasi kurva efisiensi hasil simulasi terhadap pengukuran sangat besar. Namun dengan menggeser posisi pengukuran $\geq 7,5$ cm dari permukaan detektor, deviasi dari perbandingan kurva simulasi dan pengukuran menjadi kecil sehingga penentuan *dead layer* dapat dilakukan.

Keterbatasan jumlah dan distribusi data efisiensi pada berbagai energi mempengaruhi bentuk kurva efisiensi, dalam hal ini pemilihan pangkat polinomial untuk *fitting* kurva kalibrasi menjadi sangat penting. Secara visual untuk data dalam penelitian ini polinomial terbaik untuk pendekatan kurva efisiensi adalah pangkat 3 atau 4.

Berdasarkan analisis kurva efisiensi dari laboratorium dan simulasi ini ketebalan *dead layer* adalah 1,5 mm dengan deviasi kurva kalibrasi < 8 % pada rentang energi 80 – 1400 keV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. DOWDALL, M. and SELNAS, G., *Monte Carlo Simulations for Gamma Measurements in Monitoring and Emergency Situation*, Norwegian Radiation Protection Authority, Osteras, 2006.
- [2]. RAPHAEL, *Photopeak Efficiency Calibration by Monte Carlo Method for Environment Radioactivity Analysis*, Master Disertation, the Univ. of the Western Cape, 2010.
- [3]. X-5 MONTE CARLO TEAM. MCNP, *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume II: User's Guide*, 2003.
- [4]. NUROKHIM. Analisis Sensitivitas Komponen Detektor HPGe Dengan Simulasi Monte Carlo, *Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah X, PTLR-BATAN*, 2012.

- [5]. VARGAS, M.J. et. al., Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 57, Issue 6, December 2002.
- [6]. VARGAS, M.J. et. al., Efficiency transfer in the calibration of a coaxial p-type HpGe detector using the Monte Carlo method, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 58, Issue 6, June 2003.
- [7]. KAMBOJ, S. and KAHN, B., Use of Monte Carlo simulation to examine gamma-ray interaction in germanium detectors. *Radiation Measurements*, Volume 37, Issue 1, February 2003.
- [8]. RODENAS, J. et.al., Analysis of influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Volume 496, Issues 2–3, 11 January 2003.
- [9]. BOCHUD, F. et.al., Simple Monte-Carlo method to calibrate well-type HPGe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Volume 569, Issue 3, 21 December 2006.
- [10]. CANBERRA, *Standard Electrode Coaxial Ge Detectors (SEGe)*, www.canberra.com/products/detectors/pdf/SEGe-detectors-C40021.pdf, online, 2013.
- [11]. DAMON, R.W., Determination of the photopeak detection efficiency of a HPGe detector, for volume sources, via Monte Carlo simulations, 2005.
- [12]. CANBERRA, *Genie™ 2000 Spectroscopy Software. Customization Tools, V3.1*, Canberra Industries inc., 2006.
- [13]. IAEA, *Update of X-Ray and Gamma Ray Decay Data Standards for Detector Calibration and other Applications. Volume 1: Recommended Decay Data, High Energy Gamma Ray Standards and Angular Correlation Coefficients*, IAEA Publication, Vienna, 2007.
- [14]. IAEA, *Update of X-Ray and Gamma Ray Decay Data Standards for Detector Calibration and other Applications. Volume 2: Data Selection, Assesment and Evaluation Procedures*, IAEA Publication, Vienna, 2007.
- [15]. SUVAILA, R. and SIMA, O., Complex Gamma Ray Spectra Analysis, *Romanian Reports in Physics*, Vol. 63, No.4, P.975-987, 2011.
- [16]. BOSON, J., AGREN, G., JOHANSSON, L., A detail investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Volume 587, Issue 2-3, March 2008.
- [17]. HUY, N.Q., The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Volume 621, Issue 1-3, September 2010.
- [18]. HUY, N.Q., Dead-layer thickness effect for gamma spectra measured in HPGe p-type detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. Volume 641, Issue 1, June 2011.