

Validasi ETNA (*Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurement*) untuk Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan dengan Spektrometri Gamma

Khusnul Wicaksono Sukowati¹, Gede Sutresna Wijaya², Anung Muharini³

^{1,3}Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹wicaksono.khusnul@gmail.com

³amuharini@ugm.ac.id

² Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKKB Yogyakarta 55281 INDONESIA

²gedews@batan.go.id

Intisari— Telah dilakukan penelitian mengenai validasi ETNA untuk analisis sampel radioaktivitas lingkungan dengan spektrometri gamma di Laboratorium Radioaktivitas Latar Rendah, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-BATAN. Tujuan utama penelitian ini adalah menentukan validitas penggunaan ETNA untuk menghitung efisiensi pengukuran dari sampel dengan geometri yang berbeda dari geometri kalibrasi, serta penggunaan geometri yang optimal dalam pengukuran maupun kalibrasi. Penelitian dilakukan dengan mengukur cacah sumber standar ¹⁵²Eu dan ²⁴¹Am bentuk titik dengan variasi jarak sumber-detektor 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 cm, serta standar IAEA 373 dan IAEA 375 bentuk silinder dengan jarak sumber-detektor sejauh 0, 5, dan 10 cm. Efisiensi pengukuran dari masing-masing energi dan jarak pengukuran dihitung, kemudian dibandingkan dengan efisiensi hasil perhitungan ETNA sehingga dapat ditentukan perbedaan diantaranya. Pengukuran sumber menghasilkan perbedaan nilai efisiensi di atas 10% untuk jarak sumber-detektor 5 cm dan di atas 5% untuk jarak sumber-detektor 10 cm. Perbedaan terkecil, yaitu 0,03% - 4,6% didapatkan dengan menggunakan jarak sumber-detektor sejauh 25 cm sebagai geometri kalibrasi, dengan geometri pengukuran di atas 15 cm. Pada pengukuran sumber silinder, didapatkan perbedaan nilai efisiensi terkecil sebesar 9,34%, 2,70%, dan 2,80% untuk standar IAEA 373, serta 3,50%, 0,012%, dan 1,17% untuk standar IAEA 375 pada jarak pengukuran berturut-turut 0, 5, dan 10 cm dengan menggunakan geometri kalibrasi sumber titik dengan jarak sumber-detektor 5 cm.

Kata kunci— ETNA, efisiensi pengukuran, validasi, spektrometri gamma, geometri kalibrasi, geometri pengukuran.

Abstract— The research of ETNA validation for environmental radioactivity sample analysis by gamma spectrometry were conducted in Low Background Radioactivity Laboratory, PSTA-BATAN. The objectives of this research were to determine the validity of ETNA in the calculation of radioactivity measurement efficiency of samples which have different geometry from calibration geometry and to determine the optimum of geometry for measuring and calibrating processes. The experiments were conducted by counting ¹⁵²Eu and ²⁴¹Am standard point sources with source-to-detector distance variations of 5, 10, 15, 20, 25, and 30 cm, and the IAEA 373 and IAEA 375 cylindrical standard sources with source-to-detector distance variations of 0, 5, and 10 cm. The measurement efficiency of each energy and distance was calculated and it was compared with the result of ETNA calculation to determine its difference. Point source measurements produced the difference between calculation and experimental data results above 10% for a source-to-detector distance of 5 cm and above 5% for its distance of 10 cm. The smallest differences, which were in the range of 0.03% - 4.6%, were obtained by using 25 cm a source-to-detector distance as the calibration geometry, with measurement geometry above 15 cm. In the measurements of the cylindrical sources, the smallest differences of 9.34%, 2.70%, and 2.80% were obtained for IAEA 373 standard, and 3.50%, 0.012%, and 1.17% for the IAEA 375 standard in the measurement distances of 0, 5, and 10 cm, respectively by using calibration geometry of point source with 5 cm a source-to-detector distance.

Keywords : ETNA , measurement efficiency, validation , gamma spectrometry, calibration geometry, measurement geometry

I. PENDAHULUAN

Salah satu jenis spektrometri yang sering digunakan untuk analisis sampel radioaktif adalah spektrometri gamma. Kualitas spektrometri gamma ini tergantung pada efisiensi pengukuran yang spesifik untuk setiap kondisi pengukuran.

Dalam pengukuran sampel yang tidak diketahui aktivitasnya, diperlukan kalibrasi efisiensi pengukuran terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil pengukuran yang baik. Kalibrasi efisiensi ini dilakukan menggunakan sumber standar dengan jarak pengukuran, bentuk geometri sumber, serta matriks yang sama dengan sampel yang akan diukur. Tetapi, sumber standar

untuk keperluan kalibrasi semacam ini tidak dapat selalu tersedia [1].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan *software* bernama ETNA (*Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements*). *Software* ini memungkinkan peneliti untuk melakukan perhitungan efisiensi pengukuran dengan kondisi geometri dan matriks yang berbeda antara kondisi pengukuran dan kalibrasi [2, 3].

Program ETNA menggunakan metode transfer efisiensi untuk menghitung efisiensi *full-energy-peak*. Perhitungan dilakukan berdasarkan pada kurva efisiensi eksperimental. Sampel diukur dengan menggunakan detektor yang sama, tetapi kalibrasi sampel dapat dilakukan dengan ukuran, geometri, bentuk, atau komposisi yang berbeda [4].

Dengan mengetahui parameter geometri yang berbeda dari sistem sumber-detektor untuk kondisi kalibrasi dan pengukuran, program ETNA akan menghitung faktor koreksi yang harus diterapkan untuk efisiensi. Oleh karena itu, dimungkinkan untuk mengubah dari satu geometri ke bentuk geometri lain dengan detektor yang sama. Untuk tiap energi, program secara berturut-turut mengkalkulasi dua faktor sudut ruang dan menghasilkan rasio dari keduanya dan juga nilai efisiensi yang baru (efisiensi untuk geometri pengukuran). Program ini dapat digunakan untuk detektor dengan geometri berbentuk silinder koaksial [2].

Penelitian tentang transfer efisiensi dan koreksi penjumlahan koinsiden untuk spektrometri gamma telah dilakukan. Dalam penelitian tersebut dilakukan validasi program ETNA dengan cara membandingkan hasil yang didapatkan secara komputasi ETNA dengan hasil yang didapatkan secara eksperimen. Pada penelitian ini jarak sumber ke detektor yang digunakan sebagai titik referensi untuk perhitungan transfer efisiensi sumber dengan geometri bentuk titik adalah 10 cm, dengan menggunakan sumber radioaktif yang terdeposit dalam silika densitas rendah, larutan asam hidroklorik, dan campuran pasir-resin. Hasilnya, didapatkan nilai ralat yang bervariasi, mulai dari 1 % hingga 5,8 % [5].

Pengujian empat kode umum Monte Carlo (GEANT3, PENELOPE, MCNP, dan EGS4), dan lima program khusus untuk pengukuran transfer efisiensi (ANGLE, DETEFF, GESPECOR, ETNA, dan EFFTRAN) dilakukan untuk melihat ekuivalensi nilai transfer efisiensi dari berbagai kode yang digunakan. Hasilnya, perbedaan yang didapatkan dari kode yang berbeda untuk kebanyakan kasus lebih rendah dari 2% [4].

Untuk menentukan nilai transfer efisiensi dari sumber geometri titik ke bentuk geometri lain menggunakan program ETNA telah dilakukan dengan detektor tipe HPGe (High Purity Germanium) model GMX50P4. Sumber yang digunakan pada penelitian ini adalah ^{134}Cs dengan matriks gel dan ^{137}Cs dengan matriks tanah. Rasio nilai transfer efisiensi antara hasil eksperimen dengan perhitungan program ETNA untuk sumber ^{137}Cs dengan matriks tanah adalah 1,038 untuk jarak sumber-detektor 0 mm, dan 0,966 untuk jarak sumber-detektor 20 mm. Nilai transfer efisiensi untuk sumber ^{134}Cs dalam matriks gel memiliki ketidakpastian yang lebih besar.

Ini disebabkan gangguan fenomena koinsiden pada saat pengukuran, karena ^{134}Cs merupakan sumber radioaktif dengan multi-energi [3].

Keakuratan hasil yang didapatkan dari program ETNA masih perlu diteliti lebih lanjut. Penggunaan alat yang berbeda dapat menghasilkan nilai ralat yang berbeda juga. Hasil perhitungan yang tidak akurat ini dapat menyebabkan kesalahan dalam analisis sampel. Oleh karena itu, validasi program ETNA perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat hasil yang didapatkan, dan nilai ralat dari hasil pengukuran tersebut

II. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, alat yang digunakan adalah detektor HPGe model 6C1520, seperangkat computer, *software* *Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurement* (ETNA) Version 5.5 Rev 51 dan Microsoft Office 2007 (Microsoft Excel dan Microsoft Word). Bahan penelitian meliputi sumber standar ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{133}Ba bentuk titik dan sumber standar tanah IAEA 375 dan rumput IAEA 373 dalam wadah berbentuk silinder.

Penelitian yang dilakukan dibagi menjadi 2 bagian, yaitu validasi *software* ETNA untuk sumber dengan geometri titik dan sumber dengan geometri silinder. Pada validasi ETNA untuk sumber dengan bentuk titik, sumber standar ^{152}Eu , ^{241}Am , ^{60}Co , dan ^{133}Ba bentuk titik dicacah menggunakan sistem spektrometer gamma di Laboratorium Radioaktivitas Latar Rendah, PSTA-BATAN. Pencacahan dilakukan dengan jarak sumber ke detektor divariasikan mulai dari 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, dan 30 cm dengan waktu pencacahan selama 1000 detik. Kemudian, pencacahan latar dilakukan sebanyak 3 kali pengukuran dengan masing-masing pengukuran dilakukan selama 1000 detik.

Hasil pencacahan dianalisis dengan program Genie 2000. Penandaan area dilakukan dari setiap puncak yang terdeteksi. Area yang telah ditandai ini disebut dengan *Region of Interest* (ROI). Berdasarkan ROI ini kemudian dilakukan analisis lokasi puncak, luas puncak, dan identifikasi nuklida. Luas netto (L_{net}) yang didapatkan dari analisis menggunakan Genie 2000 digunakan sebagai jumlah cacah radiasi pada perhitungan efisiensi pengukuran seperti pada Persamaan (5).

$$Eff = \frac{(L_{\text{net}})_{\text{rerata}}}{t \cdot A \cdot f} \times 100\% \quad (5)$$

dalam hal ini:

- Eff : Efisiensi (%)
- $(L_{\text{net}})_{\text{rerata}}$: luas netto rerata
- t : waktu pencacahan (s)
- A : aktivitas sumber saat pencacahan (Bq)
- f : kelimpahan (%)

Grafik efisiensi terhadap energi dibuat berdasarkan hasil perhitungan efisiensi pengukuran dari pencacahan untuk energi ^{152}Eu dan ^{241}Am . Grafik tersebut divalidasi dengan melakukan *fitting* nilai efisiensi pengukuran untuk energi dari sumber ^{133}Ba dan ^{60}Co .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendapatkan nilai transfer efisiensi menggunakan ETNA, data geometri kalibrasi yang akan digunakan sebagai referensi dalam perhitungan transfer efisiensi dimasukkan. Nilai energi dan efisiensi pengukuran dimasukkan sesuai dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan berdasarkan eksperimen. Data geometri pengukuran juga dimasukkan. Perhitungan nilai transfer efisiensi secara komputasi dilakukan.

Validasi ETNA untuk sumber dengan bentuk silinder, perhitungan koefisien atenuasi dari sampel yang digunakan dilakukan. Wadah kosong diletakkan di antara sumber dan detektor untuk mencari nilai intensitas radiasi yang melewati wadah kosong. Sampel IAEA 373 diletakkan di antara sumber ^{152}Eu untuk mendapatkan intensitas radiasi yang melewati sampel IAEA 373. Prosedur yang sama dilakukan untuk sampel IAEA 375.

Sampel rumput IAEA 373 dan sampel tanah IAEA 375 dicacah dengan sistem spektrometer gamma di Laboratorium Radioaktivitas Latar Rendah, PSTA-BATAN. Pencacahan dilakukan dengan variasi jarak sumber ke detektor 0, 5, dan 10 cm. Pencacahan dilakukan sebanyak 5 kali untuk tiap variasi jarak, dengan waktu masing-masing pencacahan selama 1000 detik.

Sebelum dilakukan perhitungan efisiensi pengukuran, terlebih dahulu aktivitas dari sampel dihitung berdasarkan data massa sampel dan aktivitas jenis sampel dengan menggunakan Persamaan (6).

$$A = \frac{SA \cdot m}{1000} \quad (2)$$

dalam hal ini:

- A : Aktivitas sumber saat pencacahan (Bq)
- SA: *Specific activity* (aktivitas jenis) (Bq/kg)
- m : massa sumber radioaktif (kg)

Setelah didapatkan aktivitas sumber radioaktif saat pencacahan, dilakukan perhitungan efisiensi pengukuran dengan menggunakan persamaan (5).

Untuk mendapatkan nilai transfer efisiensi dengan *software* ETNA, prosedur berikut ini harus dilakukan. Geometri kalibrasi ditentukan dengan menggunakan data yang telah dimasukkan pada perhitungan transfer efisiensi untuk sumber titik. *Update database* ETNA dilakukan dengan memasukkan data material sampel IAEA 373 dan IAEA 375. Geometri pengukuran ditentukan dengan cara yang sama seperti saat menentukan geometri pengukuran untuk sumber titik. Perhitungan nilai transfer efisiensi secara komputasi dilakukan

Perhitungan nilai transfer efisiensi untuk sumber silinder dilakukan dengan menggunakan geometri kalibrasi sumber titik dengan jarak sumber-detektor yang bervariasi mulai dari 5, 10, dan 20 cm. Sumber titik yang digunakan tidak memiliki energi 661,7 keV, sedangkan energi tersebut digunakan untuk merepresentasikan sumber radioaktif ^{137}Cs dalam sampel IAEA 373 dan IAEA 375. Oleh karena itu, persamaan kurva efisiensi terhadap energi untuk sumber silinder berdasarkan perhitungan program ETNA perlu dicari untuk mendapatkan nilai efisiensi pada energi 661,7 keV.

A. Validasi ETNA untuk Pengukuran Sumber dengan Bentuk Titik

Hasil pencacahan ^{152}Eu dan ^{241}Am yang didapatkan dari penelitian digunakan untuk menghitung nilai efisiensi pengukuran. Grafik efisiensi pengukuran tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.

Efisiensi pengukuran menggunakan detektor HPGe meningkat tajam pada energi di bawah 100 keV, kemudian mencapai titik balik maksimum dan menurun dengan bentuk kurva berpangkat. Titik balik maksimum ini terletak pada energi sekitar 90 keV [9].

Sifat efisiensi seperti ini terjadi karena pada energi rendah, yaitu sebelum titik balik kurva, terjadi peningkatan absorpsi pada jendela *cryostat* dan *dead layer* di depan bagian sensitif detektor yang menyebabkan banyak radiasi yang tidak sampai ke detektor [1]. Setelah energi mencapai titik balik, nilai efisiensi pengukuran ini menurun seiring dengan bertambahnya energi. Ini disebabkan efek fotolistrik lebih dominan terjadi pada interaksi foton dengan materi untuk energi yang lebih rendah dibandingkan dengan energi tinggi. Selain itu, semakin meningkatnya energi gamma, maka kemungkinan foton gamma untuk meloloskan diri dari detektor tanpa berinteraksi semakin tinggi sehingga radiasi yang sampai ke detektor akan semakin sedikit [10].

Kurva hasil efisiensi diuji validasinya dengan menggunakan energi sumber ^{133}Ba dan ^{60}Co untuk *fitting* kurva efisiensi. *Fitting* kurva dilakukan dengan memasukkan nilai energi radiasi ke dalam persamaan kurva untuk masing-masing variasi jarak sumber-detektor. *Fitting* kurva didekati dengan persamaan berpangkat. Tetapi, agar dapat didekati dengan persamaan power energi radiasi rendah perlu dihilangkan untuk mengurangi kesalahan dalam perhitungan (Gambar 3.).

Dengan memasukkan energi sebagai nilai x pada persamaan berpangkat, didapatkan efisiensi pengukuran secara perhitungan. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan hasil yang didapatkan dari pengukuran.

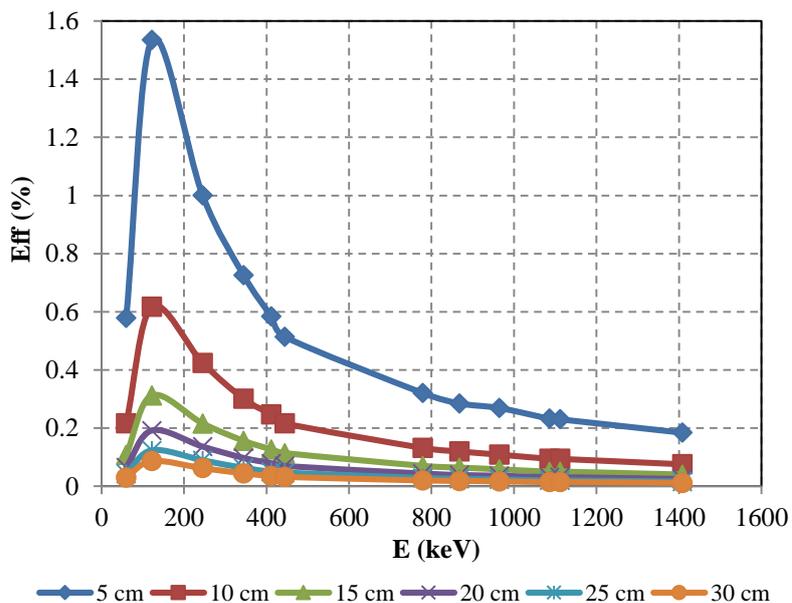
Hasil perhitungan efisiensi digunakan sebagai input untuk menjalankan program ETNA. Kalkulasi dilakukan dengan memvariasikan geometri kalibrasi untuk mendapatkan geometri kalibrasi yang optimal. Nilai efisiensi yang dihasilkan dari kalkulasi program ETNA kemudian dibandingkan dengan nilai efisiensi hasil pengukuran.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa pada geometri pengukuran 5 cm didapatkan perbedaan nilai efisiensi secara umum di atas 15%, sedangkan untuk geometri pengukuran 10 cm, secara umum didapatkan perbedaan nilai efisiensi di atas 5%. Ini disebabkan pada pengukuran dengan jarak yang semakin dekat antara sumber dan detektor, pengaruh penjumlahan sinyal koinsiden dan *deadtime* dari detektor semakin besar.

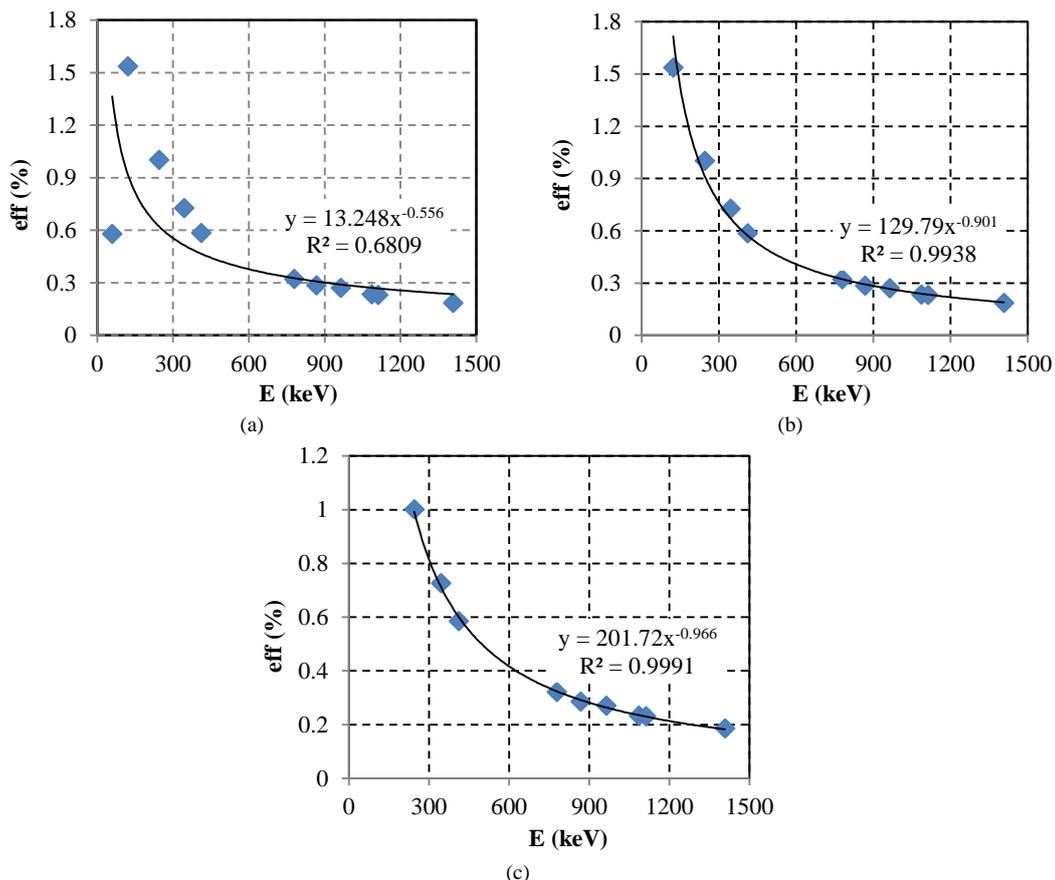
Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa program ETNA dapat memberikan hasil efisiensi secara perhitungan yang baik ketika menggunakan jarak sumber-detektor sejauh 25 cm sebagai geometri kalibrasi. Ini disebabkan pada jarak tersebut

pengaruh dari penjumlahan koinciden sudah sangat kecil, selain itu *deadtime* detektor juga memiliki nilai yang kecil sehingga cacah yang didapatkan mendekati nilai cacah yang

sebenarnya. Namun hasil yang didapatkan ini terbatas pada geometri pengukuran dengan jarak sumber-detektor sejauh 15 cm atau lebih.



Gambar 2. Grafik efisiensi pengukuran terhadap energi radiasi



Gambar 3. Perbandingan kurva efisiensi terhadap energi dengan menggunakan energi mulai 59,5 keV (a), energi mulai 121,8 keV, (b), dan energi mulai 244,7keV, (c) pada jarak sumber-detektor 5 cm

TABEL I
PERBEDAAN NILAI EFISIENSI ANTARA HASIL PERHITUNGAN ETNA DENGAN HASIL PENGUKURAN

energi (keV)	efisiensi kalibrasi (10cm)	perbedaan nilai efisiensi (%)				
		geometri pengukuran 5 cm	geometri pengukuran 15 cm	geometri pengukuran 20 cm	geometri pengukuran 25 cm	geometri pengukuran 30 cm
244,7	0,425	22,8454	1,8668	7,1333	6,1758	4,6844
344,3	0,301	19,1540	3,5908	7,2722	5,2613	4,6605
411,1	0,248	21,3844	1,9049	5,7348	1,6434	0,5282
444	0,217	20,5519	4,3819	5,8777	7,5493	3,7893
778,9	0,132	16,3666	4,8307	8,2603	6,8184	5,1594
867,3	0,12	18,8871	5,3119	5,2771	6,0180	7,1498
964	0,109	14,0300	5,4340	8,1845	6,0703	5,8020
1085,8	0,0951	14,8469	3,4095	6,1122	4,1086	3,8533
1112	0,0948	15,7039	4,6946	7,1581	6,3365	6,6024
1408	0,0763	15,8763	3,9095	6,3957	4,9481	5,7977

energi (keV)	efisiensi kalibrasi (20cm)	perbedaan nilai efisiensi (%)				
		geometri pengukuran 5 cm	geometri pengukuran 10 cm	geometri pengukuran 15 cm	geometri pengukuran 25 cm	geometri pengukuran 30 cm
244,7	0,136	32,0941	7,6019	5,5214	0,8880	2,4917
344,3	0,0972	28,5457	7,8085	4,0082	2,2060	2,8542
411,1	0,079	28,7175	6,0645	4,0212	4,2985	5,4810
444	0,0693	27,9926	6,3136	1,5198	1,8432	2,1489
778,9	0,0436	26,7573	8,6026	3,6671	1,5020	3,3091
867,3	0,0385	25,6197	5,3406	0,0503	0,6958	1,8917
964	0,0361	24,2272	8,6543	3,0226	2,3294	2,6216
1085,8	0,0308	22,1570	6,3841	2,7386	1,9949	2,2664
1112	0,0311	24,6220	7,7591	2,6512	0,8827	0,5963
1408	0,0249	23,8580	6,9575	2,7093	1,5992	0,6911

energi (keV)	efisiensi kalibrasi (25cm)	perbedaan nilai efisiensi (%)				
		geometri pengukuran 5 cm	geometri pengukuran 10 cm	geometri pengukuran 15 cm	geometri pengukuran 20 cm	geometri pengukuran 30 cm
244,7	0,0894	30,8891	6,6203	4,5588	1,0526	1,5567
344,3	0,0632	25,8063	5,5110	1,7916	2,0953	0,6623
411,1	0,0504	23,4956	1,7616	0,1988	4,0953	1,2018
444	0,047	30,5029	8,3988	3,5109	1,8916	4,1523
778,9	0,0286	24,7509	6,8835	2,0262	1,6504	1,6739
867,3	0,0258	26,2581	5,8759	0,5588	0,5958	1,3931
964	0,0235	21,2512	6,0513	0,5546	2,3701	0,1632
1085,8	0,0201	19,4809	4,0536	0,4879	2,3238	0,0261
1112	0,0206	23,7093	6,9699	1,8995	0,7345	0,1404
1408	0,0164	22,1811	5,5094	1,3187	1,3027	0,6722

energi (keV)	efisiensi kalibrasi (30cm)	perbedaan nilai efisiensi (%)				
		geometri pengukuran 5 cm	geometri pengukuran 10 cm	geometri pengukuran 15 cm	geometri pengukuran 20 cm	geometri pengukuran 25 cm
244,7	0,0626	28,9460	5,0375	3,0066	2,5216	1,5164
344,3	0,0447	25,0901	4,9103	1,2122	2,6527	0,5415
411,1	0,0354	21,8876	0,4366	1,4983	5,3441	1,2357
444	0,0321	25,2255	4,0152	0,6750	2,2288	3,9652
778,9	0,02	22,4466	4,9093	0,1417	3,4670	1,9498
867,3	0,0186	27,7386	7,1174	1,7380	1,7754	0,9792
964	0,0167	20,9044	5,7481	0,2670	2,6493	0,4077
1085,8	0,0143	19,2527	3,8548	0,2960	2,5104	0,4300
1112	0,0147	23,8416	7,0843	2,0084	0,6284	0,2510
1408	0,0118	23,2926	6,4693	2,2405	0,4048	1,1354

B. Validasi ETNA untuk Pengukuran Sumber dengan Bentuk Silinder

Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan nilai efisiensi pengukuran sumber IAEA 373 (rumpuk) lebih besar dibandingkan dengan nilai efisiensi pengukuran sumber IAEA 375 (tanah).

TABEL II
EFISIENSI PENGUKURAN UNTUK SUMBER SILINDER IAEA 373

Jarak sumber-detektor	IAEA 373			Efisiensi (%)
	Net. Area rerata	Cacah latar	Cacah netto	
0 cm	1518	3,6	1514,4	0,9506
5 cm	365	3,6	361,4	0,2269
10 cm	162,2	3,6	158,6	0,0996

TABEL III
EFISIENSI PENGUKURAN UNTUK SUMBER SILINDER IAEA 375

Jarak sumber-detektor	IAEA 375			
	Net. Area rerata	Cacah latar	Cacah netto	Efisiensi (%)
0 cm	2726	28,367	2697,63	0,8706
5 cm	661,4	28,367	633,033	0,2043
10 cm	285,6	28,367	257,233	0,0830

Ini karena densitas rumput lebih kecil dibandingkan dengan densitas tanah (0,359949 g.cm⁻³ untuk rumput dan 1,433667 g.cm⁻³ untuk tanah), sehingga koefisien atenuasi linier untuk material rumput lebih kecil dibandingkan dengan tanah. Akibatnya, radiasi dari sampel rumput lebih sedikit mengalami absorpsi diri dibandingkan dengan sampel tanah. Peristiwa absorpsi diri ini menyebabkan adanya radiasi yang tidak sampai ke detektor. Matriks dari sumber radiasi memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi pengukuran walaupun geometri sumber radiasi memiliki bentuk serta jarak sumber-detektor yang sama.

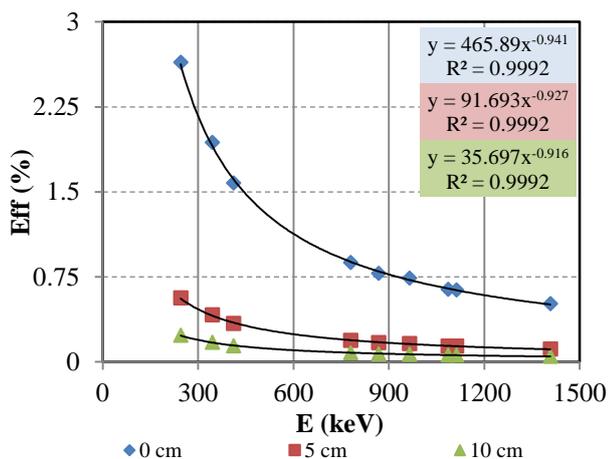
Sampel IAEA 373 dan IAEA 375 tidak tersedia pada database program ETNA, sehingga perlu dilakukan update database ETNA. Update database dilakukan dengan memasukkan nilai koefisien atenuasi massa dan densitas untuk masing-masing sumber.

Nilai koefisien atenuasi massa didapatkan secara eksperimen dengan melakukan pencacahan menggunakan sumber ¹⁵²Eu.

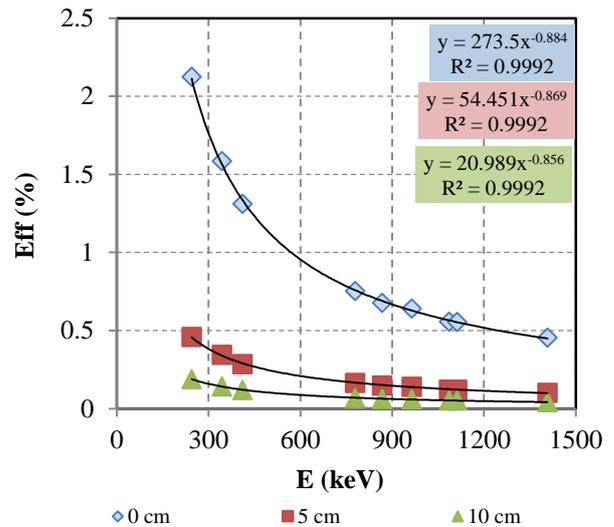
Data hasil perhitungan tersebut kemudian dibentuk menjadi grafik seperti pada Gambar 4. dan Gambar 5. agar didapatkan persamaan kurva efisiensi hasil perhitungan ETNA terhadap energi.

Dengan memasukkan energi 661,7 keV sebagai nilai x pada persamaan kurva efisiensi terhadap energi, didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.

Nilai efisiensi bersarkan perhitungan program ETNA ini kemudian dibandingkan dengan nilai efisiensi yang didapatkan melalui pengukuran sampel IAEA 373 dan IAEA 375. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 5.



Gambar 4. Grafik efisiensi hasil perhitungan ETNA terhadap energi untuk sumber IAEA 373 dengan geometri kalibrasi 5 cm



Gambar 5. Grafik efisiensi hasil perhitungan ETNA terhadap energi untuk sumber IAEA 375 dengan geometri kalibrasi 5 cm

TABEL IV
TRANSFER EFISIENSI ENERGI 661,7 KEV BERDASARKAN PERHITUNGAN ETNA

Geometri Kalibrasi	Efisiensi (%)		
	0 cm	5 cm	10 cm
5 cm	1,03939	0,232977	0,096771
10 cm	1,28454	0,269640	0,112082
20 cm	1,38297	0,290411	0,120656

Geometri Kalibrasi	Efisiensi (%)		
	0 cm	5 cm	10 cm
5 cm	0,901105	0,204282	0,083993
10 cm	1,043304	0,236562	0,097288
20 cm	1,123343	0,254675	0,104729

Dari Tabel 5 diketahui perbedaan nilai efisiensi terkecil antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan ETNA didapatkan dengan menggunakan jarak sumber-detektor sejauh 5 cm sebagai geometri kalibrasi. Untuk sampel IAEA 373, perbedaan nilai efisiensi yang didapatkan di bawah 10 %, dan untuk sampel IAEA 375 didapatkan perbedaan nilai efisiensi sampai di bawah 5 %.

TABEL V
PERBANDINGAN EFISIENSI BERDASARKAN PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN MENGGUNAKAN ETNA

Geometri Kalibrasi	Perbedaan nilai efisiensi (%)		
	0 cm	5 cm	10 cm
Sampel IAEA 373			
5 cm	9,3386	2,697910	2,79743
10 cm	35,127	18,85888	12,58215
20 cm	45,481	28,01516	21,19385

Sampel IAEA 375			
5 cm	3,4991	0,01229	1,17196
10 cm	19,832	15,78790	17,18624
20 cm	29,025	24,65326	26,14908

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan program ETNA dapat mengatasi permasalahan seandainya dalam pengukuran tidak terdapat sumber dengan geometri dan matriks yang sama untuk keperluan kalibrasi. Namun, dengan syarat koefisien atenuasi dari matriks yang digunakan serta densitas dari matriks tersebut diketahui, sebagai input dari program ETNA. Untuk mendapatkan perbedaan nilai efisiensi yang baik pada pengukuran menggunakan sumber silinder, dapat digunakan geometri kalibrasi yaitu sumber titik dengan jarak sumber-detektor sejauh 5 cm. Perbedaan nilai efisiensi yang didapatkan akan lebih baik dengan melakukan pengukuran sumber silinder pada jarak sumber-detektor sejauh 5 cm pula.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian mengenai Validasi ETNA (*Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements*) untuk analisis sampel radioaktivitas lingkungan dengan spektrometri gamma dapat diambil kesimpulan bahwa pengukuran sumber titik pada jarak 5 cm dan 10 cm dari detektor menghasilkan perbedaan nilai efisiensi yang besar, yaitu di atas 10% untuk jarak 5 cm dan di atas 5 % untuk jarak 10 cm. Ini disebabkan karena adanya pengaruh penjumlahan koinciden dan *deadtime* detektor.

Pada pengukuran sumber titik, ETNA dapat memberikan hasil efisiensi secara perhitungan yang baik, yaitu dengan perbedaan nilai efisiensi 0,03% - 4,6%, ketika menggunakan jarak sumber-detektor sejauh 25 cm sebagai geometri kalibrasi. Namun ini terbatas pada geometri pengukuran dengan jarak sumber-detektor di atas 15 cm.

Pada pengukuran sumber silinder, nilai ralat terbaik didapatkan dengan menggunakan geometri kalibrasi sumber titik dengan jarak sumber-detektor sejauh 5 cm. Perbedaan nilai efisiensi untuk sumber IAEA 373 pada geometri pengukuran dengan jarak sumber-detektor sejauh 0 cm, 5 cm, dan 10 cm berturut-turut adalah 9,34%, 2,70%, dan 2,80%, sedangkan untuk sumber IAEA 375 adalah 3,50%, 0,012%, dan 1,17%.

REFERENSI

- [1] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*. Hemisphere Publishing Corporation, United States of America, 1983.
- [2] M. C. Lépy, M.M Bé, dan F. Piton, "ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurements) Software for efficiency transfer and coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry," Note Technique LNHB/01/09/A, Laboratoire National Henri Becquerel, 2001, revised 2004.
- [3] D. Radu, D. Stanga, O. Sima, "ETNA software used for efficiency transfer from a point source to other geometries," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 67, pp.1686-1690, 2009.
- [4] T. Vidmar, N. Ćelik, N. Cornejo Díaz, A. Dlabac, I.O.B. Ewa, J.A. Carrazana González, M. Hult, S. Jovanović, M.-C. Lépy, N. Milhaljević, O. Sima, F. Tzika, M. Jurado Vargas, T. Vasilopoulou, G. Vidmar, "Testing efficiency transfer codes for equivalence," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 68, pp. 355-359, 2010.
- [5] F. Piton, M.C. Lépy, M.M. Bé, J. Plagnard, "Efficiency transfer and coincidence summing corrections for γ -ray spectrometry," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 52, pp. 791-795, 2000.
- [6] Pujadi, G. Wurdianto, H. Candra. "Analisis Kalibrasi Efisiensi Detektor HPGe Rentang Energi 121 – 1408 keV," *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXV HFI Jateng & DIY*, hal. 40-42.
- [7] M.U. Khandaker, "High Purity Germanium Detector in Gamma-ray Spectrometry," *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, Vol.1, No.2, pp. 42- 46, 2011.
- [8] Abhigyan. *Resolution and Efficiency of High Purity Germanium Detector*. Diakses dari: http://www.academia.edu/4191151/Resolution_and_Efficiency_of_High_Purity_Germanium_Detector, 11 September 2013.
- [9] A. Gültekin, G. Kaynak, O. Gürler, "Determination of full energy peak efficiency of HPGe detector from 59,5 to 1332,5 keV," *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol.44, pp. 281-286, 2006.
- [10] H. Candra, Pujadi, G. Wurdianto. "Pengaruh Efek Geometri pada Kalibrasi Efisiensi Detektor Semikonduktor HPGe Menggunakan Spektrometer Gamma". *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, hal. 258-264, Semarang, 10 April 2010.