

Validasi Metode Penentuan Cs¹³⁷ dan K⁴⁰ dalam Sampel Lingkungan dengan Spektrometri Gamma Berdasarkan ISO 17025

Muhammad Yusro¹, Gede Sutresna Wijaya², Anung Muharini³

^{1,3}Jurusan Teknik Fisika FT UGM
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹muhammad.yusrovinsky@gmail.com
³anung@ugm.ac.id

²PTAPB-BATAN
Jln. Babarsari P.O.Box 6101 ykbb Yogyakarta 55281INDONESIA
¹gedews@batan.go.id

Intisari—Validasi metode penentuan Cs¹³⁷ dan K⁴⁰ dalam sampel lingkungan dengan spektrometri gamma dilakukan untuk membuktikan bahwa parameter tersebut memenuhi persyaratan untuk penggunaannya. Penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada ISO 17025 yaitu dengan menggunakan cara :kalibrasi, *quality control*, validasi metode, ketidakpastian, dan perbandingan antar laboratorium. Berdasarkan data penelitian maka diperoleh :kalibrasi energi: $R^2=1$ (linier), kalibrasi efisiensi : semakin berat sampel semakin menurun efisiensinya, resolusi : 1,786 (1,17 MeV) dan 1,775 (1,33 MeV), sensitifitas : 0,117, *peak to compton* : 43,222, Selektivitas : Cs¹³⁷ = 0,4 keV dan K⁴⁰ = 0,9 keV, Presisi : Cs¹³⁷ = 7 data *acceptance limit* dan 1 data *warning limit* sedangkan K⁴⁰ = 7 data *acceptance limit* dan 1 data *warning limit*, akurasi : Cs¹³⁷ = 7 data $U_{score}>1$ = bias dan $Z_{score}<2$ = *satisfactory* sedangkan K⁴⁰ = 3 data $U_{score}>1$ = bias dan $Z_{score}<2$ = *Satisfactory*), linearitas : Cs¹³⁷ diperoleh $R^2 = 0.994$ dan K⁴⁰ diperoleh $R^2 = 0,909$, LoD (Bq) dan LoQ (Bq/kg) : berubah bergantung terhadap efisiensi, ketangguhan : terdapat tegangan drop dan tidak stabil. Ketidakpastian spektrometri gamma, kalibrasi efisiensi memberikan sumbangsih terbesar dalam ketidakpastian spektrometri gamma pada penelitian ini parameter akurasi perlu ditindaklanjuti dalam perbedaan hasil dalam interkomparasi laboratorium. Berdasarkan parameter-parameter diatas maka Laboratorium Lingkungan Latar Rendah PTAPB BATAN dinyatakan valid secara metode, namun memiliki catatan pada data yang bias.

Kata kunci— Validasi Metode, Spektrometri Gamma, ISO 17025

Abstract—Validation method of Cs¹³⁷ and K⁴⁰ determination in environmental sample by gamma spectrometry is used for verifying parameter that it's fulfill with regulation for using. This research is based on ISO 17025, the procedure is consisting of: calibration, quality control, validation method, uncertainties, and intercomparison of laboratory. In this research we used IAEA 373 which containing Cs¹³⁷ and K⁴⁰. Based on research data, we found: calibration of energy : $R^2=1$ (linier), calibration of efficiency : when sample is heavier the efficiency is decreasing, resolution : 1,786 at 1,17 MeV and 1,775 at 1,33 MeV, sensitivity : 0,117, peak to Compton : 43,222, Selectivity : Cs¹³⁷ = 0,4 keV and K⁴⁰ = 0,9 keV, Precision : Cs¹³⁷ = 7 data on Acceptance Limit and 1 data on warning limit meanwhile K⁴⁰ = 7 data on acceptance limit and 1 data on warning limit, accuracy : Cs¹³⁷ = 7 data get $U_{score}>1$ = bias and 8 data get $Z_{score}<2$ = *Satisfactory* meanwhile K⁴⁰ = 3 data get $U_{score}>1$ = bias and 8 data get $Z_{score}<2$ = *satisfactory*), linearity : for Cs¹³⁷ : $R^2 = 0.994$ and for K⁴⁰ : $R^2 = 0,909$, Limit of Detection (Bq) and Limit of Quantization (Bq/kg) : changes depends on efficiency, robustness : there are instability and dropping voltage in laboratory when research. Efficiency determination gives main contribution in uncertainties. In this research, accuracy needs follow up for some differences in inter-comparison of laboratory. Based on parameters, Low Background Environment Laboratory in PTAPB BATAN is validated by method, but, it has noted for some bias data.

Key Words— Validation Method, Gamma Spectrometry, ISO 17025

I. PENDAHULUAN

Validasi metoda pada alat Spektrometer Gamma dimaksudkan untuk memastikan bahwa metoda pengukuran yang digunakan memberikan hasil yang dipercaya. Validasi metoda dilakukan terhadap pengukuran unsur radioaktif Cs¹³⁷ dan K⁴⁰ yang terdapat di dalam sampel rumput IAEA 373. Sampel rumput IAEA 373 merupakan sampel lingkungan standar yang bersertifikat dan telah diketahui aktivitasnya.

II. STUDI PUSTAKA

Noviarty (2008) dalam penelitiannya Validasi Metoda Penentuan Unsur Radioaktif Pb²¹², Cs¹³⁷, dan K⁴⁰ dengan Spektrometer Gamma melakukan pengujian unjuk kerja dari Spektrometri Gamma dengan menggunakan sumber Co⁶⁰. Pengujian unjuk kerja spektrometri gamma dilakukan dengan cara menghitung *Gauss Ratio*. *Gauss Ratio* ditentukan dengan cara membagi nilai *FWTM* dengan *FWHM*[1].

Yii dan Ahmad (2008) dalam penelitiannya *Validation of Ra-226 and K-40 Measurement in Environmental Samples using Gamma Spectrometry Sistem* mengatakan ada tujuh parameter yang dijadikan acuan agar suatu laboratorium teruji validitasnya[2].

Devlote dan Povinec (2004) dalam publikasi ilmiahnya pada IAEA- TECDOC 1401 dengan judul *Quantification of Uncertainty in Gamma-Spectrometric Analysis of Environmental Samples* juga memaparkan bagaimana perhitungan dalam menentukan ketidakpastian dalam Spektrometri Gamma. Di dalam penelitian tersebut Devlote dan Povinec mengelompokkan sumber ketidakpastian dalam Spektrometri Gamma menjadi empat yaitu : preparasi sampel , kalibrasi energi and efisiensi , pengukuran atau pencacahan sampel, serta dari data nuklida itu sendiri[3].

III. DASAR TEORI

Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi bertujuan untuk mensinergikan puncak tiap energi spektrum dengan energi yang sebenarnya sehingga untuk pencacahan sampel berikutnya akan didapat spektrum dengan puncak-puncak energinya sesuai dengan energi radionuklida yang terkandung dalam sampel tersebut. Kalibrasi energi pada penelitian ini menggunakan sumber standar Eu¹⁵² dikarenakan Eu¹⁵² mempunyai banyak energi yang sangat dominan sehingga mempermudah dalam pembuatan grafik kalibrasi energi.

Persamaan grafik energi spektrometri gamma adalah sebagai berikut[4] :

$$E = aX + b(1)$$

E : energi sinar Gamma (keV)

a: kemiringan garis (keV/kanal)

b: titik potong garis pada sumbu y

X : nomor kanal (*channel*).

1. Kalibrasi Efisiensi

Keakuratan dan ketelitian pada pengukuran aktivitas zat radioaktif secara relatif menggunakan sistem spektrometer gamma dengan detektor HPGe sangat tergantung pada ketelitian dan keakuratan kalibrasi efisiensi dari sistem tersebut[5].

Persamaannya adalah sebagai berikut [6] :

$$\epsilon_{\gamma}(E) = \frac{S_{st}}{A_{st}t_{st}} \quad (2)$$

$\epsilon_{\gamma}(E)$:efisiensi pencacahan pada energi tertentu (%)

S_{st} : *net area* standar

t_{st} :waktu pencacahan standar (detik)

A_{st} :aktivitas sumber standar saat pencacahan (Bq)

γ : kelimpahan energi gamma / *yield*

Gauss Ratio

Resolusi ditentukan dari perbandingan antara *FWTM* (*Full Width atTenth Maximum*) dan *FWHM* (*Full Width at Half Maximum*) yang biasa disebut dengan *Gauss*

ratio[1].Jika hasil perhitungan *Gauss Ratio*< 2 maka pengukuran sampel spektrometer gamma dapat dilakukan [6].Persamaan Resolusi atau *Gauss Ratio* adalah sebagai berikut [7]:

$$\text{Resolusi/Gauss Ratio} = \frac{FWTM}{FWHM} \quad (3)$$

2. Sensitifitas

Sensitifitas dalam Detektor HPGe direpresentasikan dengan faktor konversi, dalam hal ini adalah faktor konversi energi per kanal. Untuk menentukan faktor konversi energi per kanal dapat dilakukan penentuan dengan cara menemukan puncak centroid dari puncak 1.173,2 keV dan 1.332,5 keV. Kemudian nilai tersebut dibagi dengan perbedaan dalam keV di antara kedua puncak dengan nomor kanal kedua puncak tersebut. Persamaan untuk menghitung sensitivitas adalah[7]:

$$\text{Sensitifitas} = \frac{(1.332,5 - 1.173,2) \text{keV}}{\text{pemisahan dalam kanal (N)}} \quad (4)$$

3. Peak to Compton

Detektor HPGe jenis Coaxial mempunyai spesifikasi khusus yaitu *Peak to Compton* (P/C). Parameter ini bergantung pada resolusi dan efisiensi (*peak/shape*).Perhitungan untuk P/C dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan [7] :

$$P/C = \frac{\text{Nilai cacah tertinggi pada energi 1,33 MeV}}{\text{Rata-rata cacah pada kanal (1.040 keV dan 1.096 keV)}} \quad (5)$$

Nilai *Peak to Compton* yang baik adalah lebih besar daripada 40,0[6].

4. Selektivitas

Selektivitas dinyatakan sebagai kemampuan detektor untuk mendeteksi puncak energi dari kedua unsur tersebut.Mengacu pada *reference sheet* puncak energi Cs¹³⁷ adalah 661,7 keV sedangkan K⁴⁰ adalah 1.480 keV.Perbedaan puncak energi < 1 keV tidak berarti ketika dibandingkan dengan rentang channel kerja dari 40 sampai dengan 2000 keV atau dalam hal ini tidak berpengaruh signifikan terhadap pengukuran [2].

5. Presisi

Presisi diukur dengan simpangan baku atau simpangan baku relatif (*Relative Standard Deviation* biasa disingkat RSD). Presisi bergantung hanya pada distribusi random error dan tidak berdasar pada nilai sebenarnya[2].

Presisi juga memiliki nilai ambang batas kualitas yang mengacu pada standard deviasi (σ) yaitu :*acceptance limit* yaitu data pada range rata-rata $\pm 1\sigma$, *warning limit* yaitu data pada range rata-rata $\pm 2\sigma$, dan *action limit* yaitu data pada range rata-rata $\pm 3\sigma$ [2].

6. Akurasi

Bias dihitung berdasarkan U_{score} dan Akurasi dihitung berdasarkan Z_{score} . Baik U_{score} maupun Z_{score} diperoleh dari perbandingan antara data hasil penelitian dengan data yang terdapat pada sertifikat. Dalam menentukan nilai akurasi ini digunakan U_{score} yang dihitung dengan persamaan [2]:

$$U_{score} = \frac{|\bar{X}_{lab} - X_{CRM}|}{\sqrt{Unc_{CRM}^2 + Unc_{lab}^2}} \quad (6)$$

X_{lab} : nilai rata-rata pengukuran

X_{crm} : nilai pada sertifikat

Unc_{crm} : standar deviasi dari sertifikat

Unc_{lab} : standar deviasi dari pengukuran

Akurasi dari pengukuran analisis data juga diestimasi dengan menggunakan persamaan statistik yang dikenal dengan Z_{score} . Nilai Z_{score} diukur dengan persamaan [2]:

$$Z = \frac{X_i - X_{ref}}{\sigma_i - \sigma_{ref}} \quad (7)$$

X_i : nilai perhitungan dari sampel yang diukur

σ_i : standar deviasi dari sampel yang diukur

X_{ref} : nilai perhitungan dari sampel referensi atau bersertifikat

σ_{ref} : standar deviasi dari sampel referensi atau bersertifikat

7. Linearitas

Linearitas adalah kemampuan metode analisis yang memberikan respon yang secara langsung atau dengan bantuan transformasi matematik yang baik, proporsional terhadap konsentrasi analit dalam sampel[2][8]. Rentang metode adalah pernyataan batas terendah dan tertinggi analit yang sudah ditunjukkan dapat ditetapkan dengan kecermatan, keseksamaan, dan linearitas yang dapat diterima. Jumlah sampel yang dianalisis sekurang-kurangnya delapan buah sampel blanko[8].

8. Batas Deteksi dan Batas Kuantisasi

MDA adalah jumlah terkecil dari aktivitas yang dapat diukur (kuantisasi) sebagai batas pengukuran, sedangkan LLD adalah jumlah terkecil dari aktivitas yang dapat dideteksi sebagai batas pengukuran[9]. Dalam kata lain pada Spektrometri Gamma. MDA adalah Batas Kuantisasi (LoQ) sedangkan LLD adalah Batas Deteksi (LoD). Untuk menghitung LLD dan MDA digunakan persamaan Curie (1968):

$$LLD = \frac{2,71 + 4,66\sqrt{B}}{T \cdot Eff \cdot \gamma} (Bq) \quad (8)$$

$$MDA = \frac{2,71 + 4,66\sqrt{B}}{T \cdot Eff \cdot W \cdot \gamma} (Bq/kg) \quad (9)$$

B : Jumlah cacah latar .

T : Waktu pencacahan latar.

Eff : Efisiensi

W : Berat sampel (kg)

γ : yield

9. Ketangguhan

Ketangguhan adalah derajat ketertiruan hasil uji yang diperoleh dari analisis sampel yang sama dalam berbagai

kondisi uji normal, seperti laboratorium, analisis, instrument, bahan, hari yang berbeda, dan lain sebagainya[2][10].

10. Ketidakpastian

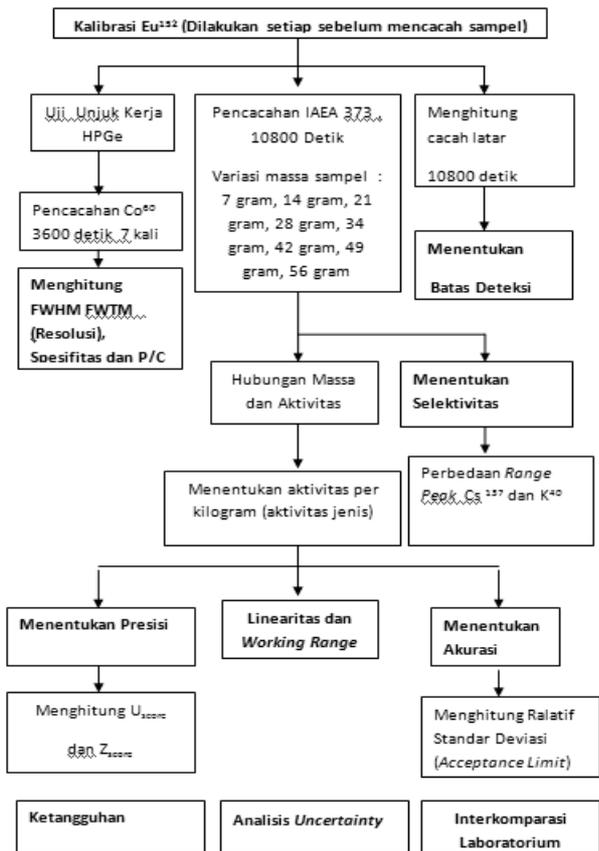
Ketidakpastian (*Uncertainty*) adalah suatu ukuran kuantitatif mutu dari sebuah hasil pengukuran, sehingga hasil pengukuran tersebut dapat diperbandingkan dengan hasil-hasil pengukuran lain, acuan, spesifikasi atau standar[11].

IV. PELAKSANAAN PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan sumber standar Eu^{152} sebagai sumber untuk kalibrasi, sumber standar Co^{60} sebagai sumber untuk menghitung unjuk kerja alat, *Certificated Reference Material* IAEA 373 sebagai sumber untuk uji validitas dan jaminan kualitas pengukuran Spektrometri Gamma pada sampel lingkungan.

Waktu pencacahan untuk kalibrasi : 300 detik, unjuk kerja : 3.600 detik, validasi : 10.800 detik.

Berikut merupakan gambar dari prosedur penelitian

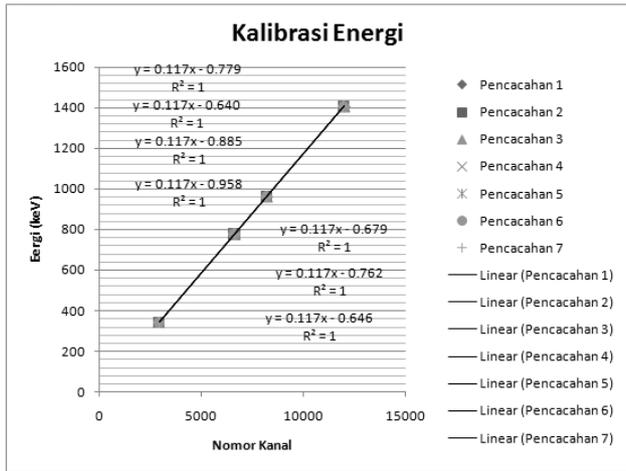


Gbr.1 Prosedur Penelitian

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

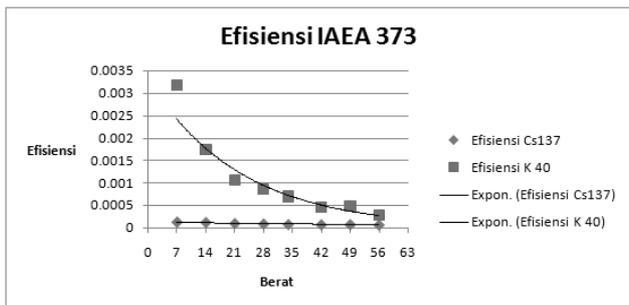
Dari data penelitiandapat dibuat grafik energi versus nomor kanal. Dari data tersebut juga dapat dilihat presisi

dan derajat keterulangan. Dalam hal ini kelinearan atau nilai R yang baik adalah 1.



Gbr.2 Grafik Kalibrasi

Untuk kalibrasi efisiensi, dari data penelitian didapat nilai efisiensi akan menurun seiring dengan bertambahnya berat sampel. Hal ini dikarenakan semakin berat sampel pada luas permukaan yang sama maka semakin tinggi sampel tersebut sehingga berpengaruh pada ketebalan sampel (faktor absorpsi diri) [12].



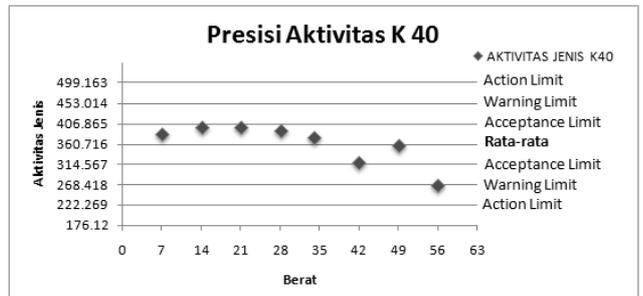
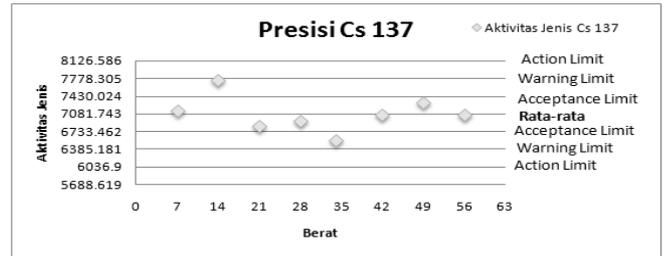
Gbr.3 Grafik Efisiensi

Dari penelitian ini diperoleh nilai *Gaus Ratio* sebesar 1,786 untuk energi 1.173,2 keV dan sebesar 1,775 untuk energi 1.332,5 keV. Pada penelitian ini didapatkan hasil sensitifitas berkisar antara 0,117318 keV/kanal sampai 0,117651 keV/kanal. Nilai *peak to compton* adalah 43,222. Berdasarkan delapan kali pengulangan pencacahan dapat dilihat bahwa spektrometri gamma dapat membedakan puncak energi Cs¹³⁷ dan K⁴⁰. Diperoleh data bahwa puncak energi Cs¹³⁷ berkisar antara 661,5 sampai 661,9 dengan perbedaan sekitar 0.4 KeV sedangkan nilai untuk K⁴⁰ berkisar antara 1.460,6 sampai 1.461,5 dengan perbedaan sebesar 0,9 keV.

Perbedaan puncak energi < 1 keV tidak berarti ketika dibandingkan dengan rentang channel kerja dari 40 sampai dengan 2000 keV atau dalam hal ini tidak berpengaruh signifikan terhadap pengukuran [2].

Untuk presisi, berdasarkan hasil yang didapat maka nilai aktivitas Cs¹³⁷ dan K⁴⁰ pada IAEA 373 dengan perbedaan variasi berat mayoritas berada dalam wilayah nilai presisi yang dapat diterima (*acceptance*) adapun dua

data *warning* (peringatan) yang terjadi adalah faktor ketidakastian pengukuran (*uncertainty measurement*) yang sebaiknya ditindak lanjuti.

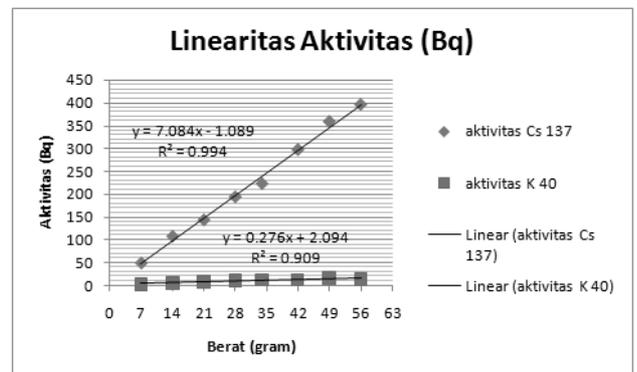


Gbr.4 Presisi Cs¹³⁷ dan K⁴⁰

Untuk akurasi diperoleh U_{score} berkisar antara 0,392292 sampai dengan 3,797905 dan Z_{score} berada dibawah nilai 2. Sedangkan untuk untuk aktivitas K⁴⁰ diperoleh U_{score} berkisar antara 0,705248 sampai dengan 3,484423 dan Z_{score} berada dibawah nilai 2. Perhitungan U_{score} ini tidak boleh melebihi 1,5 agar metode ini tidak bias, dan untuk Z_{score} harus dibawah nilai 2 agar metode ini dalam kategori memuaskan[2].

Pada penelitian ini, nilai Z_{score} sudah dalam katagori memuaskan. Namun, untuk U_{score} terdapat 10 data dari 18 data yang diperoleh nilainya lebih besar daripada 1,5 maka hasil kualitas pengukuran ini berada dalam katagori bias[2].

Berdasarkan grafik linearitas dapat dilihat bahwa grafik menunjukkan adanya linearitas. Pada K⁴⁰ dapat dilihat bahwa kemiringan lebih landai (derajat kemiringan lebih kecil) dari pada Cs¹³⁷. Hal ini dikarenakan, K⁴⁰ adalah unsur alam yang memiliki aktivitas kecil yaitu 432 Bq/kg.



Gbr.5 Linearitas

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian didapat untuk batas deteksi dan kuantisasi nilai LLD untuk K^{40} lebih besar daripada nilai Cs^{137} . Hal ini dikarenakan nilai cacah *background* pada K^{40} lebih tinggi dari pada Cs^{137} . Mengingat K^{40} adalah unsur alam yang terdapat pada lingkungan maka untuk laboran maupun analis ketika ingin mencacah K^{40} haruslah memperhatikan limit deteksi. Dari penelitian ini untuk Cs^{137} dan K^{40} didapatkan hasil LoD dan LoQ berubah sesuai dengan perubahan efisiensi yang dipengaruhi faktor geometri.

Pada penelitian ini ada dua hal yang menyebabkan pengambilan data terganggu yaitu puncak yang tidak sempurna dan kegagalan dalam pencacahan (tegangan drop saat pencacahan berlangsung).

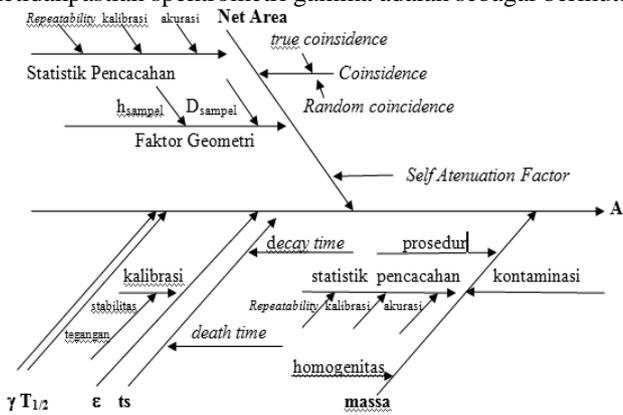
Puncak yang tidak sempurna ini diakibatkan oleh adanya tegangan yang belum stabil atau tegangan masih menyesuaikan dengan setting operasi. Puncak yang tidak sempurna mengakibatkan net area tidak sama dengan pencacahan pada umumnya.

Berdasarkan Penelitian ini sumber dari ketidakpastian dapat dikelompokkan menjadi empat katagori menurut asalnya [3] :

1. ketidakpastian berhubungan dengan preparasi,
2. ketidakpastian kalibrasi energi dan efisiensi ,
3. ketidakpastian pengukuran,
4. serta ketidakpastian dari data nuklir itu sendiri.

Ketidakpastian aktivitas dari radionuklida yang mempertimbangkan ketidakpastian dalam pengukuran adalah fungsi dari beberapa kuantitas yaitu efisiensi detektor, probabilitas emisi gamma, perhitungan pencacahan, faktor koreksi, dan lain-lain.

Berdasarkan analisis diatas maka bentuk dari ketidakpastian spektrometri gamma adalah sebagai berikut:



Gbr.6 Cause-Effect Diagram

Pada sertifikat tecantum bahwa nilai aktivitas jenis untuk Cs^{137} 12.350 Bq/kg dan K^{40} adalah 432 Bq/kg , dengan *confidence interval* 95%. Dari sertifikat dicantumkan dari 110 laboratorium untuk Cs^{137} data laboratorium yang diterima sejumlah 84 laboratorium dan untuk K^{40} sejumlah 76 laboratorium. Jika mengacu pada hasil penelitian ini, dari parameter-parameter yang diujikan hanya parameter akurasi yang perlu ditindak lanjuti karena memperoleh beberapa hasil bias.

Kesimpulan

Berdasarkan data penelitian maka diperoleh :

1. Kalibrasi Energi : $R^2=1$ (Linier),
2. Kalibrasi Efisiensi : Semakin berat sampel semakin menurun efisiesinya,
3. Resolusi : 1,786 (1,17 MeV), 1,775 (1,33 MeV).
4. Sensitifitas: 0,117,
5. Peak to Compton: 43,222,
6. Selektivitas : $Cs^{137} = 0,4$ keV, $K^{40} = 0,9$ keV,
7. Presisi : Cs^{137} : 7 data *Acceptance Limit*, 1 data *Warning Limit* K^{40} : 7 data *Acceptance Limit*, 1 data *Warning Limit*
8. Akurasi : Cs^{137} : 7 data memiliki $U_{score} > 1 =$ bias, $Z_{score} < 2 =$ *Satisfactory*), K^{40} : 3 data memiliki $U_{score} > 1 =$ bias, $Z_{score} < 2 =$ *Satisfactory*),
9. Linearitas : $Cs^{137} : R^2 = 0,994$, $K^{40} : R^2 = 0,909$
10. LoD dan LoQ
 Cs^{137} : LoD = 0,001, LoQ = 0,032
 K^{40} : LoD = 0,015, LoQ = 0,526

Ketangguhan : terdapat tegangan drop dan tidak stabil
 Ketidakpastian Spektrometri Gamma bersumber dari :

1. ketidakpastian preparasi sampel,
2. ketidakpastian kalibrasi energi dan efisiensi ,
3. ketidakpastian pengukuran,
4. serta ketidakpastian dari data nuklir itu sendiri.

Parameter Akurasi perlu ditindaklanjuti dalam perbedaan hasil dalam interkomparasi laboratorium
 Setting dari Instrument Laboratorium diindikasikan sebagai sumber dari perbedaan performa Spektrometri Gamma.

Saran

1. Penambahan stabilizer yang baik akan menambah hasil dari pengulangan (*repeatability*) dan ketangguhan dari validasi metode Speaktrometri Gamma pada Laboratorium Lingkungan Latar Rendah PTAPB BATAN Yogyakarta.
2. Pengecekan secara berkala tentang validasi metode perlu dilakukan agar jaminan mutu terhadap hasil pengukuran tetap berkualitas
3. Para Laboran hendaknya disiplin dalam melakukan metode pengukuran secara bertahap, seperti pengecekan resolusi dan kalibrasi.
4. Untuk meminimalisir kesalahan hasil pengukuran, para laboran hendaknya memperhatikan penyebab-penyebab ketidakpastian pengukuran.

REFERENSI

[1] Noviarty. "Validasi Metoda Penentuan Unsur Radioaktif Pb-212, Cs -137, K-40 Dengan Spektrometer Gamma". Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan ISSN 1979-2409 No. 01/ Tahun I. April 2008

- [2] Yii Mei Wo and Zaharudin Ahmad. "Validation Of Ra-226 And K-40 Measurement In Environmental Samples Using Gamma Spectrometry Sistem " *The Malaysian Journal Of Analytical Sciences Vol. 12 No. 1 (2008)* Industrial Technology Division Agensi Nuklear Malaysia Bangi, 43000 KAJANG, MALAYSIA
- [3] C.Dovlete, P.P.Povinec." Quantification of Uncertainty in Gamma Spektrometric Analysis of Enviromental Samples". Marine Environment Labortory, IAEA Monaco, 2004
- [4] Wahyudi , Dadong Iskandar , Djoko Marjanto." Pengaruh Matriks Terhadap Pencacahan Sampel Menggunakan Spektrometer Gamma". JFN, ISSN 1978-8738 Vol.1 No.2, November 2007
- [5] Badan Standardisasi Nasional RSNI4. "Rancangan Standar Nasional Indonesia 4 Mutu Air – Penentuan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida – Metode Spektrometri Sinar Gamma Resolusi Tinggi". RSNI4 ISO 10703:2009
- [6] Wibowo, L. Narko." Analisis Performa Spektrometer Gamma EG&G ORTEC." Urania ISSN 0852-4777 Vol.12 No.1 Januari 2006
- [7] EG & G ORTEC, "Operator's Manual Spectrometer Gamma EG & G ORTEC", Tennessee, USA, 1995
- [8] Badan Standar Nasional. "Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi". (ISO/IEC 17025:2005, IDT)"
- [9] Paul Bailey. "Comparison Of NaI And HPGe Minimum Detectabel Activities". Environmental Measurements Laboratory U.S. Department of Energy New York, November 2002.
- [10] Julia Kantasubrata. "Dasar Ketidakpastian Pengukuran". Dasar Pelatihan-Laboratorium-Terpadu-Fmipa-Uii
- [11] J.P. Perez-Moreno, E.G. San Migeuel, J.P. Bolhar, J.L. Aguado." A Comperhensive Calibration Method of Ge Detector for Low-Level Gamma Spectrometry Measurements". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Reasearch*, A 491 152-162, 2002