STANDARDISASI RADIONUKLIDA ^{57}Co SECARA RELATIF MENGGUNAKAN SISTEM PENCACAH SPEKTROMETER GAMMA DAN KAMAR PENGION $4\pi\text{-}\gamma$

Radionuclide Standardization of ^{57}Co with Relative Method by Using Gamma Spectrometer and Ionization Chamber $4\pi\text{-}\gamma$ Counting System

Hermawan Candra, Gatot Wurdianto, Holnisar

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya 49, Jakarta Selatan
Email : hermawan@batan.go.id

Abstrak

Telah dilakukan standarisasi radionuklida ^{57}Co . Metode yang digunakan untuk perhitungan aktivitas secara relatif. Radionuklida ^{57}Co mempunyai waktu paruh ($T_{1/2}$): 271,8 hari dan 2 energi gamma yang berintensitas tinggi, yaitu 122,060(12) keV (85,51%) dan 136,47(29)keV (10,71%). Tahap standarisasi radionuklida ^{57}Co meliputi pembuatan cuplikan ^{57}Co dalam bentuk geometri cair dalam vial, cair dalam ampul dan padat dalam bentuk *point source*. Pencacahan cuplikan ^{57}Co dilakukan menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma detektor semikonduktor HPGe dan kamar pengion $4\pi\gamma$. Hasil pengukuran aktivitas ^{57}Co dengan metode relatif dengan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ tanpa pengenceran: $(518,18 \pm 16,12)$ Bq/mg, dengan pengenceran: $(520,65 \pm 16,3)$ Bq/mg dan sistem pencacah spektrometer- γ detektor HPGe: $(517,94 \pm 15,49)$ Bq/mg. Aktivitas jenis rata-rata sebesar $(518,92 \pm 1,50)$ Bq/mg. Standardisasi radionuklida ^{57}Co secara relatif dengan sistem pencacah detektor semikonduktor HPGe dan kamar pengion $4\pi\gamma$ dapat dilakukan dengan baik dengan hasil yang memuaskan. Dengan perbedaan pengukuran sebesar 0,28% dan ketidakpastian pengukuran di bawah 5%.

Kata kunci: standarisasi radionuklida, radionuklida ^{57}Co , metode relatif spektrometer gamma, kamar pengion $4\pi\text{-}\gamma$

Abstract

Radionuclide standardization of ^{57}Co were carried out. The method used to calculate radioactivity in relative method. ^{57}Co radionuclide has half live ($T_{1/2}$) of 271.8 days and with 2 gamma energies of 122.06(12) keV (85.51%) and 136.47(29) keV (10.71%). Radionuclide standardization covering steps of ^{57}Co preparation in the forms of liquid in vial, liquid in ampoule and solid in point source. ^{57}Co sample was counted with gamma spectrometer counting system with HPGe semiconductor detector and ionization chamber $4\pi\text{-}\gamma$ counting system. The result showed that the average radioactivity measurement of ^{57}Co radionuclide with relative method were as follow with ionization chamber $4\pi\gamma$ counting system without dilution was (518.18 ± 16.12) Bq/mg, and with dilution was (520.65 ± 16.30) Bq/mg, and gamma spectrometer with HPGe detector counting system was (517.94 ± 15.49) Bq/mg. Average specific activity was (518.92 ± 1.50) Bq/mg. Radionuclide standardization of ^{57}Co with relative method with gamma spectrometer with HPGe detector counting system and ionization chamber $4\pi\gamma$ counting system has been done well with excellent result and discrepancy measurement was 0.28% and uncertainty measurement under 5%.

Keywords: radionuclide standardization, ^{57}Co radionuclide, relative method, gamma spectrometer, ionization

1. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang nuklir telah berkembang dan menyebar ke berbagai bidang kegiatan. Agar pemanfaatan radiasi pengion dapat memberikan manfaat sebesar-besarnya dengan risiko bahaya radiasi sekecil-kecilnya maka pengukuran radiasi secara tepat dan akurat merupakan suatu hal yang harus benar-benar menjadi prioritas utama. Salah satu pengembangan ilmu pengetahuan nuklir adalah tersedianya sumber standar radionuklida sebagai sumber acuan untuk kalibrasi peralatan. Sumber

standar radionuklida banyak digunakan oleh pemangku kepentingan di Indonesia, misal lembaga penelitian, industri dan rumah sakit. Sebagian besar sumber standar tersebut buatan luar negeri. Oleh sebab itu, penelitian dan pengembangan dalam bidang nuklir harus diarahkan untuk menggunakan produk dalam negeri. Hal ini dinilai lebih efisien karena harga sumber standar radioisotop cukup mahal dan selain dapat mengurangi ketergantungan produk luar negeri dan mengurangi nilai impor sehingga lebih menghemat devisa negara. Dengan berbekal pada penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir khususnya mengenai metrologi radiasi maka

standardisasi sumber standar radionuklida sebagai sumber acuan pengukuran aktivitas sangat mungkin dilakukan.

Metrologi radiasi merupakan ilmu pengetahuan dalam bidang pengukuran radiasi, yang meliputi: radioaktivitas, dosis, intensitas radiasi, waktu paruh dan sifat-sifat lain dari radionuklida pada penggunaan radiasi pengion

Salah satu kegiatan dari bidang metrologi radiasi adalah standardisasi radionuklida. Standardisasi radionuklida adalah kegiatan menyiapkan dan membuat sumber standar radionuklida yang digunakan dalam pemanfaatan teknologi nuklir dan berfungsi sebagai acuan dalam pengukuran radioaktivitas pada bidang keselamatan radiasi dan keselamatan lingkungan. Beberapa langkah dalam pembuatan sumber standar adalah:

- penyiapan penyangga sumber standar radionuklida;
- penyiapan pelarut (larutan pengemban) untuk sumber standar radionuklida;
- pemilihan metode penentuan aktivitas sumber standar radionuklida; dan
- pengukuran dan perhitungan radioaktivitas

Pada kegiatan metrologi radioaktivitas, diperlukan sumber standar radionuklida untuk kalibrasi alat ukur radiasi. Pada saat ini sumber standar radionuklida yang digunakan sebagian besar masih impor dari negara lain.

Pengukuran aktivitas dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu metode absolut atau sering disebut dengan metode langsung dan metode relatif atau metode tidak langsung. Pengukuran radioaktivitas secara absolut adalah pengukuran radioaktivitas dilakukan tanpa membandingkan dengan sumber standar dan tidak memerlukan sumber standar serta penentuan hasil pengukuran didasarkan pada perhitungan matematis. Perangkat alat ukur aktivitas yang digunakan antara lain sistem pencacah absolut $4\pi\beta(\text{PC})$ - γ koinidensi, sistem pencacah absolut γ - γ koinidensi dan $4\pi\beta(\text{LS})$ - γ koinidensi. Adapun metode pengukuran radioaktivitas secara relatif adalah pengukuran radioaktivitas memerlukan sumber standar sebagai acuan dan penentuan hasil pengukuran berdasarkan perbandingan dengan sumber standar serta alat yang digunakan harus dikalibrasi dengan sumber standar. Perangkat alat ukur aktivitas yang digunakan antara lain sistem pencacah spektrometer gamma, detektor semikonduktor *High Purity Germanium* (HPGe), detektor sintilasi NaI(Tl) dan kamar pengion $4\pi\gamma$.

Pada penelitian ini telah dilakukan standardisasi radionuklida ^{57}Co menggunakan

metode relatif dengan sistem pencacah spektrometer gamma detektor semikonduktor HPGe dan kamar pengion $4\pi\gamma$. Pemilihan radionuklida ^{57}Co ini berdasarkan banyaknya kebutuhan radionuklida tersebut pada kedokteran nuklir untuk kalibrasi alat ukur aktivitas. Radionuklida ^{57}Co ini dapat digunakan sebagai simulator radionuklida $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang mempunyai waktu paruh pendek (6,02 jam). Radionuklida ^{57}Co dan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ mempunyai energi gamma yang berdekatan.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh metode standardisasi radionuklida secara relatif yang banyak digunakan di bidang kedokteran sebagai sumber standar radioisotop untuk kalibrasi alat ukur aktivitas di bagian kedokteran nuklir rumah sakit dan pengendalian mutu pengukuran aktivitas radiofarmaka di rumah sakit. Selain itu, dengan dilakukannya standardisasi radionuklida ^{57}Co ini untuk memelihara standar-standar nasional satuan ukuran (SNSU) di bidang radiasi pengion. Beberapa penelitian mengenai standardisasi radionuklida ^{57}Co pernah dilakukan oleh MEC (N. Tsaoufanidis, 1983) (D. Novkovic, 2012). Penelitian dan pengembangan mengenai metode standardisasi radionuklida berbagai radionuklida secara terus menerus dikembangkan untuk menjamin tersedianya sumber standar buatan dalam negeri sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap produk luar negeri.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Radionuklida ^{57}Co meluruh melalui tangkapan elektron (*elektron capture EC*). Pada mode peristiwa tangkapan elektron ini proton berubah menjadi neutron dengan cara menangkap elektron (e^-) dari orbital K atau L dan diikuti dengan pancaran neutrino dan sinar-X.

Skema peluruhan ^{57}Co dengan mode peluruhan tangkapan elektron disajikan pada Gambar 1. Pada skema tersebut dapat dijelaskan bahwa pada kulit K atau L yang kosong diisi oleh elektron dengan tingkat energi yang lebih tinggi dan kekosongan yang baru akibat pengisian pada orbital K atau L akan diisi oleh elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi lagi sampai susunan elektron pada konfigurasi yang stabil.

Radionuklida ^{57}Co mempunyai waktu paruh 271,80 (5) hari dan energi transisi tangkapan elektron adalah $\epsilon_{0,4}$:129,6(4) keV, $\epsilon_{0,3}$:469,2(4) keV, $\epsilon_{0,2}$:699,5(4) keV, $\epsilon_{0,1}$:821,6(4) keV dan $\epsilon_{0,0}$:836,0(4) keV (K. B.

Lee, et.al, 2011) (D.B. Kulkarni, 2013). Dari transisi tangkapan elektron tersebut, inti atom tereksitasi pada akhirnya menuju ke tingkat *ground state* dengan memancarkan radiasi elektromagnetik berupa pancaran foton sinar gamma dan besarnya energi gamma pada tiap- tiap transisi tingkat energi adalah:
 $E_{Y_{1,0}}$:14,41(31) keV, $E_{Y_{2,1}}$:122,06(12) keV,
 $E_{Y_{2,0}}$:136,47(29) keV, $E_{Y_{3,2}}$:230,27(3) keV,
 $E_{Y_{4,3}}$:339,67(3) keV, $E_{Y_{3,1}}$:352,34(2) keV,
 $E_{Y_{3,0}}$:366,74(3) keV, $E_{Y_{4,2}}$:569,94(4) keV,
 $E_{Y_{2,1}}$:692,01(2) keV, $E_{Y_{4,0}}$:706,42(2) keV
 sesuai dengan tabel peluruhan ^{57}Co .

Pada metode pengukuran aktivitas secara relatif dilakukan dengan cara membandingkan hasil cacahan cuplikan dengan hasil cacahan sumber standar. Ketepatan atau ketelitian pada metode ini sangat bergantung pada kemampuan pencacahan peralatan, yaitu efisiensi peralatan dan kesesuaian bentuk geometri antara cuplikan dan sumber standar yang meliputi ukuran, bentuk, jenis radiasi dan jenis radionuklida. Sistem pencacah untuk pengukuran aktivitas secara relatif adalah kamar pengion $4\pi\gamma$ dan spektrometer gamma.

Sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ merupakan salah satu sistem pencacah untuk pengukuran aktivitas secara relatif. Alat ukur aktivitas *dose calibrator Capintec CRC 7 BT* yang terkalibrasi merupakan salah satu jenis kamar pengion $4\pi\gamma$. Pada sistem pencacah spektrometer gamma dengan detektor HPGe dapat digunakan untuk analisa kualitatif dan kuantitatif. Analisa kualitatif dilakukan dengan cara kalibrasi energi yang benar akan menghasilkan ketelitian yang tinggi sehingga pengukuran cuplikan dapat dilakukan. Kondisi pengukuran cuplikan harus sama dengan saat kondisi kalibrasi.

Gambar 1. Skema Peluruhan ^{57}Co

Gambar 2. Geometri pengukuran ^{57}Co

Adapun analisa kuantitatif dilakukan dengan cara melakukan kalibrasi efisiensi untuk menentukan luas puncak serapan total yang merupakan jumlah cacah yang terkandung dalam suatu puncak. Sumber radioaktif memancarkan sinar ke segala arah (4π).

Efek geometri jarak antara sumber dan detektor menyebabkan hanya sebagian saja dari sinar- γ yang dipancarkan cuplikan akan terdeteksi. Hal ini berkaitan dengan efisiensi deteksi sinar- γ . Efisiensi pada spektrometri gamma merupakan efisiensi mutlak dari puncak serapan total. Efisiensi deteksi merupakan fungsi energi $\epsilon(E)$. Apabila dilakukan pengukuran efisiensi dari E_{γ} rendah (<100 keV) sampai E_{γ} tinggi (1500 keV) maka dapat dibuat kurva kalibrasi efisiensi yaitu plot antara efisiensi dan energi- γ . Nilai efisiensi deteksi pengukuran ditentukan berbagai faktor, yaitu yaitu jarak antara cuplikan dengan detektor, bentuk geometri sumber radioaktif, volume detektor, daya pisah elektronik.

Sumber standar yang sering dipakai pada analisa kualitatif dan kuantitatif ini adalah sumber standar multigamma ^{152}Eu . Sumber standar ini mempunyai rentang energi- γ dari terendah sampai tertinggi yaitu dari E_{γ} 121-1408 keV dan mempunyai waktu paruh panjang, 13,522 tahun.

3. METODE PENELITIAN

Pembuatan Cuplikan

Pada penelitian ini, sampel ^{57}Co dibuat dalam bentuk geometri cair dalam ampul, sedangkan geometri padat dalam bentuk titik (*point source*). Aktivitas sumber radioaktif pada cuplikan disesuaikan dengan rentang ukur

kemampuan peralatan atau detektor yang akan digunakan untuk pengukuran. Sumber radioaktif ^{57}Co dalam bentuk cair dalam ampul diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ Capintec CRC 7 BT dan bentuk padat diukur menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma detektor HPGe.

Pada tahap awal sumber radioaktif ^{57}Co induk cair dalam vial yang diperoleh dari Polatom Polandia diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ Capintec CRC 7BT dengan tujuan untuk memperkirakan aktivitas jenis dan besarnya faktor pengenceran. Aktivitas jenis sumber radioaktif ^{57}Co cair adalah 30,95 MBq/gram sebagai larutan induk. Aktivitas sumber radioaktif induk ^{57}Co yang masih terlalu tinggi tersebut perlu diencerkan menggunakan larutan pengemban (larutan carrier): 0,05g/l CoCl_2 dalam 1M HCl.

Sumber radioaktif ^{57}Co larutan induk dipreparasi untuk membuat sampel dengan perlakuan tanpa pengenceran dan dengan pengenceran. Besar kecilnya pengenceran disesuaikan dengan peralatan atau detektor yang akan digunakan untuk pengukuran. Larutan induk ^{57}Co sebanyak 1,7222 gram gram diambil dan dimasukkan dalam ampul tanpa pengenceran (Ampul A5701). Sebagian kecil larutan induk ^{57}Co diambil sebanyak 0,3296 gram, kemudian ditambah larutan pengemban sebanyak 3,127 gram sehingga jumlah total menjadi 3,4569 gram. Faktor Pengenceran (*dilution factor*) adalah berat total dibagi berat larutan induk, yaitu 10,487 kali.

Sumber radioaktif master ^{57}Co cair yang sudah diencerkan diteteskan pada 2 buah ampul standar PTKMR, yaitu ampul A5702 dan ampul A5703. Radionuklida ^{57}Co pada Ampul A5702 mempunyai berat 1,692 gram dan pada Ampul A5703 mempunyai berat 1,547 gram. Wadah ampul A5702 ditutup rapat dan dilakukan pengukuran menggunakan detektor kamar pengion $4\pi\gamma$ Capintec. Sampel cair dalam ampul disajikan pada Gambar 2.

Pada pengukuran aktivitas sumber radioaktif ^{57}Co dengan sistem pencacah spektrometer gamma detektor HPGe, sampel dibuat dalam bentuk geometri padat (*point source*). Sumber radioaktif ^{57}Co cair hasil pengenceran diteteskan pada penyangga sumber *mylar* bahan plastik tipis (PE) menggunakan *baby bottle*. Penimbangan cuplikan menggunakan metode gravimetri dengan cara variasi berat, menggunakan timbangan semi mikro Tipe ABT 220-5 DMT 7037 buatan KERN. Cuplikan dibuat dengan jumlah 4 buah sampel dalam bentuk geometri

padat (*point source*). Sumber radioaktif ^{57}Co sebelum dan sesudah diteteskan pada penyangga sumber *mylar* bahan plastik tipis (PE) ditimbang sehingga berat masing masing tetesan diketahui. Setelah dilakukan penimbangan sampel dikeringkan dan setelah kering dilakukan penutupan menggunakan bahan plastik tipis (PE) untuk mencegah terjadinya kontaminasi. Sampel padat (*point source*) disajikan pada Gambar 3.

Gambar 3. Sampel cair

Gambar 4 Sampel padat

Pencacahan Sampel

Sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ Capintec CRC-7BT dan spektrometer- γ detektor HPGe

Sampel ^{57}Co bentuk cair tanpa pengenceran dalam ampul A5701 dan bentuk cair dengan pengenceran dalam ampul A5702 diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ Capintec CRC 7 BT terkalibrasi. Posisi cuplikan ampul tersebut di tengah-tengah sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ dengan jarak 7 cm dari dasar lubuk. Pengukuran dilakukan dengan 5 (lima) variasi periode pengukuran.

Sampel ^{57}Co bentuk padat (*point source*) M 5701, M 5702, M 5703 dan M 5704 diukur menggunakan spektrometer- γ detektor HPGe. Sumber standar yang digunakan adalah sumber standar ^{152}Eu buatan Laboratorium primer *Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisant* (LMRI) yang mempunyai rentang energi- γ rendah sampai tinggi, yaitu 121 keV sampai 1408 keV. Sumber standar ^{152}Eu dipilih sebagai sumber standar karena mempunyai waktu paruh panjang (13,522 tahun) dan mempunyai rentang energi gamma yang lebar yaitu antara 121 keV sampai 1408 keV.

Gambar 5 Kamar pengion 4π

Gambar 6 Spektrometer- γ HPGe

Ketidakpastian Pengukuran

Pada bidang metrologi radiasi penentuan ketidakpastian pengukuran merupakan tahap yang harus dilakukan. Pada saat melakukan pengukuran harus memperhatikan faktor-faktor yang

mempengaruhi pengukuran sehingga dapat menentukan ketidakpastian pengukuran dengan benar. Acuan BIPM mengenai : *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* telah memberikan informasi tentang cara mengevaluasi ketidakpastian pengukuran. Beberapa tahap yang perlu dilakukan adalah mengidentifikasi komponen-komponen ketidakpastian dan menetapkan berapa besar nilainya.

Komponen ketidakpastian dikategorikan menjadi 2, yaitu tipe A dan tipe B. Komponen Ketidakpastian tipe A dievaluasi dengan cara statistik dan ditujukan untuk data hasil pengambilan data secara berulang. Adapun tipe B dievaluasi dengan non- statistik dan dengan cara “*scientific judgement*”, yaitu dengan data pengukuran sebelumnya, pengalaman dan pengetahuan, spesifikasi pabrik, data kalibrasi dan dari data acuan serta ditujukan untuk data sekunder maupun tersier. Pada penelitian ini telah dihitung ketidakpastian standar gabungan yang diperoleh dari komponen-komponen ketidakpastian pengukuran tipe A dan tipe B.

Ketidakpastian standar gabungan dihitung dengan cara akar jumlah kuadrat ketidakpastian individu berdasarkan formula sebagai berikut:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u(x_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} u(x_n)\right)^2}$$

dengan

x_1 adalah ketidakpastian individu dari tipe A

x_2 adalah ketidakpastian individu dari tipe B

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran aktivitas radionuklida ^{57}Co bentuk cair dalam ampul A5701 (tanpa pengenceran) dan bentuk cair dalam ampul A5702 dengan pengenceran menggunakan sistem pencacah kamar pengion 4π yang terkalibrasi dengan sumber standar dari laboratorium primer *National Institute of Standards and Technology* (NIST) Amerika.

Tabel 1. Hasil pengukuran ^{57}Co bentuk cair dalam ampul kode A5701 (tanpa pengenceran)

Kode Sumber	Waktu Pengukuran	Aktivitas jenis ^{57}Co (Bq/mg)	Aktivitas jenis ^{57}Co (Bq/mg)
A5701	Pengukuran 1	8062,074	5443,59 $\pm$ 0,7
	Pengukuran 2	7632,769	5451,13 $\pm$ 1,16
	Pengukuran 3	7072,748	5425,05 $\pm$ 0,58
	Pengukuran 4	6419,163	5410,94 $\pm$ 1,66
	Pengukuran 5	6243,060	5439,89 $\pm$ 0,47
	Rerata		5434,12
Std Dev.		16,06	
Komponen ketidakpastian pengukuran ^{57}Co menggunakan sistem pencacah kamar pengion 4πγ terdiri dari komponen statistik pencacahan, sumber standar, penimbangan, waktu paruh, akurasi bacaan, respon detektor dan kedapatulangan. Perhitungan ketidakpastian gabungan pada pengukuran ^{57}Co bentuk cair dalam ampul A5701 (tanpa pengenceran) setara dengan 3,11% seperti disajikan pada Tabel 2.		Pengukuran 3	664,411
			509,63 $\pm$ 0,25
		Pengukuran 4	623,514
			525,58 $\pm$ 0,22
		Pengukuran 5	588,959
			513,19 $\pm$ 0,11
		Rerata	520,65
		Std Dev.	12,13

Tabel 2. Komponen Ketidakpastian Pengukuran Aktivitas ^{57}Co kode A5701 menggunakan Kamar Pengion (tanpa pengenceran) dalam%.

Komponen Ketidakpastian	Ketidakpastian Pengukuran (%)	Tipe
Statistik		
pencacahan	0,16	Tipe A
Sumber standar	1,9	Tipe B
Penimbangan	0,25	Tipe B
Waktu Paruh	0,018	Tipe B
Akurasi bacaan	1	Tipe B
Respon detektor	2	Tipe B
Kedapatulangan	1	Tipe B
Ketidakpastian Gabungan		
	3,11	

Hasil pengukuran aktivitas ^{57}Co bentuk cair A5702 dengan pengenceran dan faktor pengenceran sebesar FP:10,487 disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran ^{57}Co bentuk cair dalam ampul kode A5702 (dengan pengenceran FP:10,487) menggunakan kamar pengion 4πγ dengan variasi waktu pengukuran.

Kode	Waktu	Aktivitas jenis ^{57}Co (Bq/mg)	Aktivitas jenis ^{57}Co (Bq/mg)
A5702	Pengukuran 1	799,130	539,58 $\pm$ 0,3
	Pengukuran 2	721,491	515,27 $\pm$ 0,3

Komponen-komponen ketidakpastian pengukuran ^{57}Co menggunakan sistem pencacah kamar pengion 4πγ terdiri dari komponen statistik pencacahan, sumber standar, penimbangan, waktu paruh, akurasi bacaan, respon detektor kedapatulangan dan pengenceran. Perhitungan ketidakpastian gabungan pada pengukuran ^{57}Co bentuk cair dalam ampul A5701 (dengan pengenceran) setara dengan 3,13%.

Tabel 4. Komponen Ketidakpastian Pengukuran Aktivitas ^{57}Co kode A5702; (dengan pengenceran) menggunakan kamar pengion 4πγ dalam%

Komponen Ketidakpastian	Ketidakpastian Pengukuran (%)	Tipe
Statistik		
pencacahan	0,39	Tipe A
Sumber standar	1,9	Tipe B
Penimbangan	0,25	Tipe B
Waktu Paruh	0,018	Tipe B
Akurasi bacaan	1	Tipe B
Respon detektor	2	Tipe B
Kedapatulangan	1	Tipe B
Faktor Pengenceran		
	0,05	Tipe B
Ketidakpastian Gabungan		
	3,13	

Nilai aktivitas rata-rata ^{57}Co tersebut apabila dikoreksi dengan faktor pengenceran sebesar 10,487 maka diperoleh aktivitas mula-mula sebesar adalah (5460,057 $\pm$ 127,07) Bq/mg. Perbedaan hasil pengukuran cuplikan

tanpa pengenceran dan dengan pengenceran sebesar 0,48%. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pengenceran dan proses pengukuran cuplikan bentuk cair dalam ampul menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ cukup akurat di bawah 0,5%

Ketidakpastian pengukuran ^{57}Co bentuk cair A5701 tanpa pengenceran menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ lebih kecil dibandingkan dengan ketidakpastian pengukuran ^{57}Co bentuk cair A5702 dengan pengenceran. Selain itu, komponen ketidakpastian statistik pencacahan pada ^{57}Co bentuk cair A5701 juga lebih kecil dibandingkan dengan ^{57}Co bentuk cair A5702. Oleh karena itu, ketidakpastian gabungan ^{57}Co bentuk cair A5701 juga lebih kecil seperti yang disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 4 di atas. Hal ini disebabkan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ lebih optimal digunakan untuk mengukur sumber radioaktif dengan rentang ukur aktivitas tinggi. Aktivitas ampul A5701 lebih tinggi daripada A5702 sehingga fluktuatif hasil pengukuran A5702 lebih besar dan tingkat kesalahannya pengukuran juga besar.

Pengukuran aktivitas radionuklida ^{57}Co bentuk padat (*point source*) menggunakan sistem pencacah spektrometer- γ dengan detektor semikonduktor kemurnian tinggi (*High Purity Germanium* HPGe). Sampel radionuklida ^{57}Co dalam bentuk padat (*point source*) dibuat sebanyak 4 buah. Pengukuran dilakukan pada jarak sampel dan detektor 25 cm. Analisa kualitatif dan kuantitatif menggunakan sumber standar multi- γ ^{152}Eu buatan laboratorium primer LMRI dan kurva kalibrasi efisiensi disajikan pada Gambar 7 dan spektrum gamma ^{57}Co disajikan pada Gambar 8.

Gambar 7. Kurva kalibrasi efisiensi

Gambar 8. Spektrum Energi- γ ^{57}Co

Pada kurva kalibrasi efisiensi energi menggunakan sumber standar multi gamma Eu-152 LMRI menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe pada rentang energi gamma 121 keV sampai 1408 keV diperoleh persamaan kurva kalibrasi efisiensi $Y=0,0675 X^{-0,856}$ dengan nilai korelasi R^2 cukup baik sebesar 0.9977. Persamaan kurva kalibrasi efisiensi tersebut digunakan untuk menghitung aktivitas radionuklida ^{57}Co pada energi gamma 122,06(12)keV dan 136,47(29)keV. Dengan menggunakan spektrometer gamma telah diperoleh spektrum energi gamma radionuklida ^{57}Co dan terlihat bahwa tidak ada radionuklida pengotor (impuritas) pada radionuklida tersebut. Hasil pengukuran aktivitas ^{57}Co bentuk padat *point source* menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengukuran ^{57}Co bentuk padat *point source* (dengan pengenceran) menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe

Kode	Waktu	Aktivitas jenis ^{57}Co	Aktivitas jenis ^{57}Co
Sumber	Pengukuran	Bq/mg	(Bq/mg)
M5702	Pengukuran 1	2691,04	519,46±15,58
M5703	Pengukuran 2	2671,55	517,02±15,51
M5704	Pengukuran 3	2679,77	518,61±15,56
M5705	Pengukuran 4	2669,74	516,67±15,50
	Rerata		517,94
	Std Dev,		1,32

Komponen-komponen ketidakpastian pengukuran ^{57}Co menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma terdiri dari komponen sumber standar, umur paruh sumber standar, intensitas standar, net area standar, efisiensi deteksi, umur paruh sampel, net area sampel, penimbangan dan faktor

pengenceran. Perhitungan ketidakpastian gabungan pada pengukuran ^{57}Co bentuk padat *point source* (dengan pengenceran) menggunakan spektrometer gamma setara dengan 2,99%.

Tabel 6. Komponen Ketidakpastian Pengukuran Aktivitas ^{57}Co bentuk padat *point source* (dengan pengenceran) menggunakan Spektrometer gamma dalam %

Komponen Ketidakpastian	Ketidakpastian Pengukuran (%)	Tipe
Sumber standar	2,5	Tipe B
Umur paruh sumber standar	0,118	Tipe B
Intensitas standar	0,53	Tipe B
Net area standar	0,87	Tipe A
Efisiensi deteksi	1,06	Tipe A
Umur paruh sampel	0,018	Tipe B
Intensitas sampel	0,07	Tipe B
Net area sampel	0,72	Tipe A
Penimbangan	0,25	Tipe B
Faktor Pengenceran Ketidakpastian Gabungan	0,05	Tipe B
	2,99	

Pada Tabel 7 disajikan perbandingan hasil pengukuran aktivitas radionuklida ^{57}Co menggunakan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ dan spektrometer- γ detektor HPGe

Tabel 7. Hasil pengukuran aktivitas radionuklida ^{57}Co

Geometri Sumber	Aktivitas jenis ^{57}Co Metode Relatif (Bq/mg)	
	Kamar Pengion $4\pi\gamma$	Spektrometer- γ Detektor HPGe
Cair Ampul A5701	518,18 $\pm$ 16,12	
Cair Ampul A5702	520,65 $\pm$ 16,30	
Padat (Point Source)		517,94 $\pm$ 15,49

5. KESIMPULAN

Standardisasi radionuklida ^{57}Co secara relatif dapat dilakukan dengan sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ dan spektrometer- γ detektor HPGe dengan hasil yang akurat dengan perbedaan pengukuran sebesar 0,28% dan ketidakpastian pengukuran di bawah 5%. Hasil pengukuran aktivitas rata-rata ^{57}Co dengan metode relatif sistem pencacah kamar pengion $4\pi\gamma$ dan

spektrometer- γ detektor HPGe adalah (518,92 $\pm$ 1,50) Bq/mg.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada: Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi BATAN yang memfasilitasi penelitian ini dan rekan-rekan di Sub Bidang Standardisasi Radionuklida dan Instrumentasi PTKMR yang telah membantu penulis sehingga karya ilmiah ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Nicholas Tsoulfanidis, *Measurements and Detection of Radiation*, University of Missouri-Rolla, 1983
- NCRP Report No.58, *A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures*, National Council on Radiation Protection and Measurements, November 1978
- Lowenthal, Oakley, *Standardization of Radioactivity*, General Nucleonics Division, Australia Atomic Energy Commission, 1966
- D. Novkovic, A.Kandic, I. Vukanac, M.Durasevic, Z. Milosevic, *The diirect measurement of ^{57}Co activity by the sum-peak method*, Journal Applied Radiation and Isotopes, Vol: 70 (2012) pp 2154-2156
- Hermawan Candra, Pujadi, Gatot Wurdianto, *Standardisasi Radionuklida ^{57}Co* , Prosiding Annual Meeting on Testing and Quality 2014 Pusat Penelitian Sistem Mutu dan Teknologi Pengujian Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, (2014)
- TdeR, 2005 Laboratoire National Henry Becquerel LNE-LNHB/CEA, Table de Radionuclides, Recommended Data/table, Atomic and NuclearData, 2005, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- Han-Yull Hwang, Ki Suk Sung, K.B. Lee, Jong Man Lee, Tae Soon Park, *Standardization of radionuclide by $\beta(\text{LS})$ - γ coincidence counting using the geometry-efficiency variation method*, Journal Applied Radiation and Isotopes, Vol: 64 (2006) pp 1119-1123
- K.B. Lee, Jong Man Lee, Tae Soon Park, Pil Jei Oh, Sang Han Lee, Min Kie Lee, *Application of digital sampling techniques for $4\pi\beta(\text{LS})$ - γ coincidence counting*, Journal Nuclear Instruments

- and Methods in Physics Research* A 626-627(2011)72
- D.B. Kulkarni, R. Anuradha, Leena Joseph, B.S. Tomar, Development of liquid scintillation based $4\pi\beta(\text{LS})\text{-}\gamma$ coincidence counting system and demonstration of its performance by standardization of ^{60}Co , *Journal Applied Radiation and Isotopes*, Vol: 72 (2013) pp 68-72
- ICRU Report 52, *Particle Counting in Radioactivity Measurements*, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1994)
- Chapra, *Metode Numerik Untuk Teknik*, UI Press, 1991
- IEC 1452 International Standard, Nuclear Instrumentation – Measurement of gamma-ray emission rates of radionuclides – Calibration and use of germanium spectrometers
- Schrader, H. 1997, *Activity Measurements with ionization Chambers*, Monographie BIPM-4, Bureau International des poids et Mesures, sevrès, France
- Capintec, Inc, *CRC-7BT Radioisotope Calibrator*, Owner Manual
- K. Debertin And R.G. Helmer, *Gamma and X-Ray Spectrometry With Semiconductor Detector*, 1988
- ISO/IEC Guide 98-3:2008 *Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995)
- BIPM, *Procedures for Accurately Diluting and Dispensing Radioactive Solutions*
- K.B. Lee, *Calibration issues and shape factor analysis*, Radiation Metrology Center KRISS, October 2010
- Wisnu Susetyo, *Instrumentasi Nuklir II*, BATAN