

## UJI PERFORMA LABORATORIUM AAN PADA PENGUKURAN RADIONUKLIDA DENGAN AKTIVITAS RENDAH

Sri Murniasih dan Sukirno

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

Jl. Babarsari No. 21 Po Box 6101 ykbb Yogyakarta 55281

email: smurni83@gmail.com

### ABSTRAK

*UJI PERFORMA LABORATORIUM AAN PADA PENGUKURAN RADIONUKLIDA DENGAN AKTIVITAS RENDAH. Telah dilakukan uji performa laboratorium AAN – PSTA dalam rangka pengukuran aktivitas radioaktivitas I-131. Tujuan kegiatan ini adalah untuk mengetahui kinerja laboratorium dalam pengujian suatu sampel radiaktivitas rendah. Cuplikan yang diuji berupa sumber radioaktivitas I-131 berbentuk disk plastik tipis dengan berat tertentu. Evaluasi hasil uji performa laboratorium dilakukan oleh tim penyelenggara program uji profesiensi (PTKMR-BATAN). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pengujian sumber titik radioaktivitas I-131 dengan metoda komparatif memberikan hasil cukup baik dengan kesalahan dibawah 10 %. Hasil evaluasi uji performa berguna sebagai kontrol mutu eksternal pada metode pengujian yang diharapkan di laboratorium AAN.*

*Kata Kunci: evaluasi, uji performa, kinerja laboratorium, aktivitas rendah, radioaktivitas I-131*

### ABSTRACT

*THE PERFORMANCE TEST OF NAA LABORATORY AT RADIONUCLIDE MEASURE WITH LOW ACTIVITY. The performance test to measure the I-131 radionuclide activity has been carried out at CAST-NAA laboratory. The purpose of this activity is to know the performance of a laboratory in the testing of low radioactivity sample. The tested sample consists of the form I-131 radionuclide sources shaped thin plastic disk with a certain weight. Evaluation of laboratory performance test results carried out by the organizer of the program test appeal (PTKMR-BATAN). Evaluation results showed that testing of point source of the I-131 radionuclide with comparative method gives a good enough results with errors below 10%. The results of the performance test evaluation are useful as the external quality control to a testing method that is expected in NAA laboratory.*

*Keywords: evaluation, performance test, laboratory performance, low activity of I-131 radionuclide*

### PENDAHULUAN

Beberapa dekade terakhir penggunaan radioaktivitas bagi kehidupan umat manusia terus meningkat baik dalam bidang industri, teknik, pertanian, kedokteran, ilmu pengetahuan, hidrologi dan lain-lain. Tujuan penggunaan radioisotop bagi kehidupan manusia adalah untuk kesejahteraan manusia dan memudahkan kelangsungan hidup manusia. Radioaktivitas banyak digunakan sebagai perunut dan sumber radiasi. Radioaktivitas digunakan sebagai perunut karena sifat kimia yang sama dengan isotop stabil. Sedangkan penggunaan radioaktivitas sebagai sumber radiasi berdasarkan sifat radiasi yang dihasilkan zat radioaktif dapat mempengaruhi materi atau makhluk baiki efek fisis, efek kimia maupun efek biologis.

Dalam bidang kedokteran radioaktivitas digunakan untuk mendeteksi atau diagnose berbagai penyakit antara lain Tc-99, Tl-201, I-131, Na-24, Xe-133, P-32, Sr-85, Se-75, Co-60 dan Fe-59. Penggunaan radioaktivitas pada bidang kedokteran selalu memperhatikan manfaatnya dan waktu luruh

radioaktivitas. Salah satu radioaktivitas yang banyak digunakan dalam bidang kedokteran adalah iodin. Radioaktivitas Iodin-131 (I-131) diserap terutama oleh kelenjar gondok, hati dan bagian-bagian tertentu dari otak. Oleh karena itu, I-131 dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada kelenjar gondok, hati, dan untuk mendeteksi tumor otak. Sedangkan Iodin-123 (I-123) adalah radioisotop lain dari Iodin yang memancarkan sinar gamma sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi penyakit otak. Pemilihan penggunaan iodin di bidang kedokteran disebabkan waktu paruh iodin yang pendek yaitu 8,04 hari sehingga diharapkan treatment pasien yang telah diinjeksikan radioaktivitas I-131 dapat dilakukan lebih cepat.

Agar dapat melakukan pengukuran radioaktivitas aktivitas rendah dan waktu paruh yang cepat dengan hasil yang memuaskan suatu laboratorium harus mempunyai kemampuan khusus dalam mendeteksi aktivitas radioaktivitas tersebut. Laboratorium Analisis Aktivasi Neutron (AAN) mencoba melakukan uji perfoma dalam pengukuran radioaktivitas aktivitas rendah dalam rangka meningkatkan kemampuan analisisnya. Hal ini sesuai

dengan standar SNI ISO/IEC 17025: 2008 butir 5.9.1 yang berisi persyaratan umum kompensasi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi, dinyatakan bahwa laboratorium harus mempunyai prosedur pengendalian mutu untuk memantau keabsahan pengujian [1]. Keabsahan dapat dipantau dengan beberapa cara, salah satunya adalah partisipasi dalam uji profisiensi antar laboratorium atau uji profisiensi.

Program Uji profisiensi merupakan suatu program untuk melakukan evaluasi kinerja laboratorium kalibrasi/pengujian terhadap kriteria yang telah ditetapkan pada suatu laboratorium sesuai kompetensinya. Uji profisiensi antar laboratorium telah digunakan secara luas untuk beberapa tujuan dan penggunaannya terus meningkat secara internasional [2]. Beberapa tujuan umum uji profisiensi berdasarkan SNI ISO/IEC 17043:2010 [3], antara lain: a) Evaluasi kinerja laboratorium dalam pengujian atau pengukuran tertentu dan pemantauan kinerja laboratorium; b) Identifikasi permasalahan di laboratorium serta inisiasi untuk peningkatan; c) Penetapan efektivitas dan keseprofisiensi (*comparability*) metode uji dan pengukuran; d). Identifikasi perbedaan antar laboratorium; e) Edukasi bagi laboratorium-laboratorium yang berpartisipasi berdasarkan hasil uji profisiensi; f) Evaluasi karakteristik kinerja dari sebuah metode.

Program uji profisiensi antar laboratorium merupakan salah satu media yang sangat penting sebagai sarana jaminan mutu eksternal (*external quality control*) bagi laboratorium pengujian dan kalibrasi sesuai persyaratan standar SNI ISO/IEC 17025:2008. Dengan mengikuti program uji profisiensi laboratorium melakukan evaluasi kinerja pengujian yang dilakukan dalam rangka peningkatan kemampuan secara kesinambungan untuk memberikan layanan yang terbaik bagi pelanggan.

Lembaga Internasional yang secara rutin menyelenggarakan kegiatan uji profisiensi antar laboratorium adalah Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), terutama dalam pengukuran radioaktivitas sampel lingkungan baik berupa sampel hasil kontaminasi ataupun sampel alami [4-6]. IAEA secara aktif mempromosikan pembentukan sistem laboratorium berkualitas di Negara-negara anggotanya dengan memberikan program-program dan dukungan teknis dalam kerjasama dengan Badan laboratories di Seibersdorf. Program uji profisiensi biasanya berupa penentuan radioaktivitas dalam air tanah [7-10]. Di Indonesia, Komite Akreditasi Nasional (KAN), laboratorium BMD dan BATAN juga menyelenggarakan program uji profisiensi secara rutin [11-12]. Sampel disediakan oleh koordinator penyelenggara uji profisiensi dalam ini adalah PTKMR-BATAN.

Laboratorium AAN telah tiga kali mengikuti uji profisiensi ini yaitu tahun 2013 sampel berupa sumber radioaktivitas Co-60 dan Cs-137, pada tahun 2014 sampel berupa sumber radioaktivitas Cs-134 dan pada tahun 2015 dipilih sampel yang mempunyai aktivitas rendah dengan waktu paruh yang relative pendek diprofisiensi sampel sebelumnya yaitu sumber radioaktivitas I-131. Uji profisiensi dapat digunakan sebagai evaluasi unjuk kerja atau uji performa laboratorium AAN – PSTA dalam pengukuran radioaktivitas yang mempunyai aktivitas rendah. Kegiatan ini diikuti oleh 19 laboratorium dari 10 Unit Kerja di lingkungan BATAN.

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mengetahui kemampuan masing-masing laboratorium dalam pengukuran aktivitas zat radioaktif pemancar gamma, dalam hal ini yang di uji adalah radioaktivitas I-131. Manfaat dari kegiatan ini salah satunya adalah meningkatkan performa dari laboratorium peserta sehingga kedepan diharapkan semua laboratorium di lingkungan BATAN mempunyai kualitas yang realtif sama.

## TATA KERJA

### Penerimaan Sampel dan Analisis Spektrometri Gamma

Sampel diperoleh dari koordinator penyelenggara uji profisiensi yaitu berupa sumber radioaktivitas I-131 dalam bentuk disk yang tidak diketahui beratnya. Sampel diterima oleh laboratorium AAN tanggal 08 Juli 2015. Dilakukan pencacahan awal menggunakan spektrometri gamma dengan detektor semikonduktor HPGe yang dilengkapi perangkat lunak Genie 2000. Detektor yang digunakan memiliki efisiensi relatif 35 % dan resolusi 1,925 keV pada energi gamma Co-601332 keV. Metoda yang digunakan adalah absolut menggunakan *point source* pada penentuan efisiensi detektor [9-10]. Pengukuran dilakukan dengan pengulangan sebanyak 7 (tujuh) kali pada waktu yang berbeda-beda. Penentuan efisiensi detektor menggunakan radioaktivitas multi energi Eu-152.

### Penentuan ketidakpastian

Perhitungan ketidakpastian dilakukan dengan menyusun suatu model dari sistem pengukuran untuk mengetahui semua faktor yang dapat memberikan kontribusi kesalahan terhadap hasil akhir pengukuran [15]. Perhitungan ketidakpastian baku tipe A ( $\mu$ ), perkiraan ketidakpastiannya dengan cara pengukuran atau pengamatan berulang, maka dapat dihitung kembali nilai rata-ratanya [17].

$$\mu = S / \sqrt{n} \quad (1)$$

Perhitungan ketidakpastian baku tipe B ( $\mu$ ), nilai ketidakpastian yang dilaporkan bersumber dari acuan

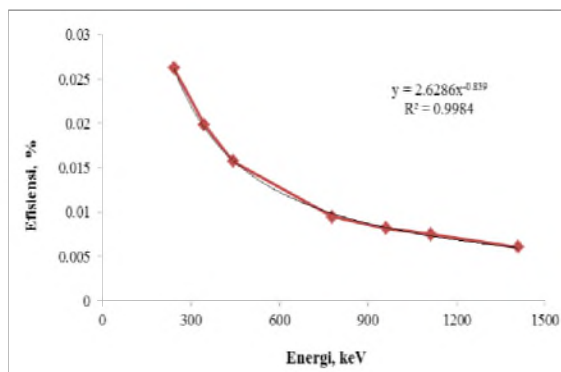
dalam sertifikat, untuk distribusi normal persamaan (2) dan distribusi rektangular persamaan (3) dengan tingkat kepercayaan 95 %

$$\mu (x) = S / 2, \text{ atau } S / 1,96 \quad (2)$$

$$\mu (x) = S / \sqrt{3} \quad (3)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 1 dapat dilihat penentuan kalibrasi efisiensi detektor HPGe menggunakan standar multi energi gamma Eu-152 pada jarak 4 cm dari permukaan detektor. Pengukuran dilakukan selama 500 detik sehingga menghasilkan data pengukuran aktivitas tiap energi yang memenuhi syarat. Data tersebut dengan bantuan program Excel dibuat kurva dengan persamaan polynomial. Dari persamaan yang diperoleh pada kurva kalibrasi efisiensi dapat digunakan untuk menentukan efisiensi I-131 pada tenaga 364,48 keV yang mempunyai probabilitas 81,34 %. Hasil pengukuran yang telah dimasukkan pada persamaan kalibrasi efisiensi diperoleh nilai efisiensi I-131 sebesar 0,01965.



**Gambar 1.** Kalibrasi efisiensi detektor HPGe menggunakan standar multi energi Eu-152

### Hasil perhitungan sumber radioaktivitas I-131 dalam bentuk disk

Pada penentuan spektrum yang dihasilkan spektrometri gamma dari analisis sampel sumber I-131 berbentuk disk, diidentifikasi pada puncak-puncak gamma karakteristiknya [16]. Pada umumnya radioaktivitas mempunyai lebih daripada satu tenaga

karakteristik, sehingga dipilih energi yang mempunyai probabilitas terbesar dan tidak ada interferensi dengan energy dari radioaktivitas lainnya.

Pengukuran awal sampel I-131 dilakukan pada tanggal 10 Juli 2016, jam 14.57.53 WIB, menghasilkan cacah 7190 dengan waktu pengukuran 20000 detik, sehingga diperoleh cacah perdetik (cps) = 0,3595. Semua hasil pengukuran dari 7 kali pengulangan lainnya dikembalikan pada saat awal pencacahan yaitu tanggal 10 Juli 2016, jam 14.57.53 WIB sehingga diperoleh  $t_0$ . Pada Tabel 1 disajikan hasil pengukuran sampel sumber radioaktivitas I-131 dalam bentuk disk yang dilakukan 7 kali pengulangan dengan waktu yang berlainan, mulai dari 3600 detik sampai 52000 detik. Hasil disintegrasi per second (dps) menghasilkan nilai berkisar 21,634 sampai 23,2839 dengan rerata dps adalah 22,1890 serta mempunyai nilai standad deviasi (SD) yaitu 0,268.

### Faktor-faktor yang berpengaruh pada ketidakpastian metoda

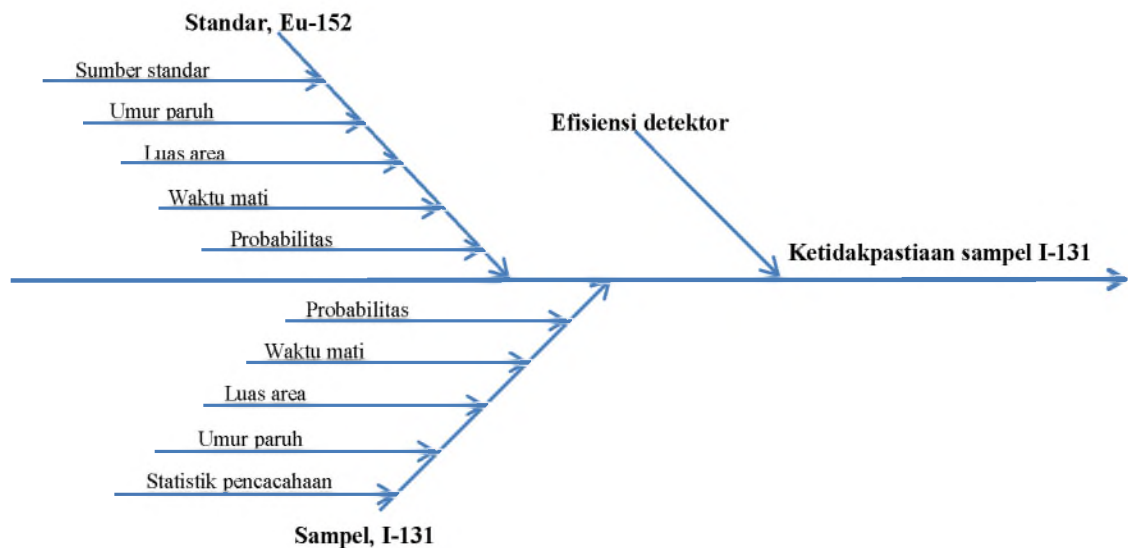
Faktor-faktor yang mempengaruhi pada saat menentukan ketidakpastian pengukuran sumber radioaktivitas I-131 dalam bentuk disk, terdapat beberapa langkah yang harus diperhatikan, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Kemurnian standar,  $T_{1/2}$  standar, Waktu mati pencacahan, statistik standar, Probabilitas standar, Efisiensi pengukuran (4 cm), Statistik pengukuran sampel, Probabilitas sampel,  $T_{1/2}$  sampel, Waktu mati sampel [17].

### Perhitungan ketidakpastian untuk radioaktivitas I-131

Perhitungan ketidakpastian pada penentuan aktivitas sampel radioaktivitas I-131. menggunakan standar CRM (Eu-152) yang disajikan pada Tabel 2 dan 3. Pada Tabel 2 dapat dilihat hasil perhitungan ketidakpastian baku pada analisis Eu-152 sebagai standar dan I-131 sebagai sampel yang akan ditentukan. Ada 11 komponen ketidakpastian yang akan ditentukan seperti terlihat pada Gambar 1 yaitu *cause and effect* diagram faktor yang berpengaruh pada ketidakpastian sampel radioaktivitas I-131. Pada Tabel 2 disajikan nilai masing-masing ketidakpastian baku dari tiap komponen

**Tabel 1.** Pencacahan sampel I-131 dengan 7 kali pengulangan pada waktu yang berbeda

No.	Pencacahan		Luas area	t, cacah	Cps	T, tunda hari	cps0	Probabilitas	Efisiensi	Dps
	Tanggal	Jam								
1	10/07/15	14:57:53	7190	20000	0,3595	0	0,3595	0,813	0,01965	22,0131
2	13/07/15	07:21:07	1839	6087	0,3021	2,6828	0,38025	0,813	0,01965	23,2839
3	13/07/15	07:21:07	5855	20000	0,2927	2,6828	0,36849	0,813	0,01965	22,5636
4	15/07/15	08:36:13	858	3600	0,2383	4,7349	0,35773	0,813	0,01965	21,9046
5	23/07/15	10:55:39	2178	18000	0,121	12,832	0,3637	0,813	0,01965	22,2705
6	23/07/15	15:57:30	6009	52000	0,1156	13,041	0,35365	0,813	0,01965	21,6546
7	24/07/15	06:24:59	3892	35500	0,1096	13,644	0,35331	0,813	0,01965	21,6340
Rerata aktivitas I-131										22,1890
Standar deviasi (SD)										0,268

**Gambar 2.** Cause and effect diagram (fish-bone diagram) faktor yang berpengaruh pada ketidakpastian sampel radioaktivitas I-131.

Penentuan ketidakpastian dengan metoda komparatif melibatkan standar dan sampel yang akan diuji, sehingga dilakukan ketidakpastian gabungan. Hasil perhitungan ketidakpastian gabungan ini menghasilkan nilai 1,0955 %, yang dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk menentukan konsentrasi pada metoda komparatif digunakan persamaan ketidakpastian gabungan ( $\mu_c$ ) yang ada pada Tabel 3.

Aktivitas sampel I-131 dari hasil perhitungan pada Tabel 1 yaitu 22,1890 dps atau setara dengan 22,189 Bq. Ketidakpastian diperluas pada metoda komparatif menghasilkan nilai 2,191 % atau 0,486 Bq. Sehingga nilai aktivitas sumber I-131 dalam

bentuk disk mempunyai nilai aktivitas sekitar  $22,189 \pm 0,486$  Bq, pada tanggal 10 Juli 2015, jam 14.57.53 WIB.

### Evaluasi hasil pengukuran:

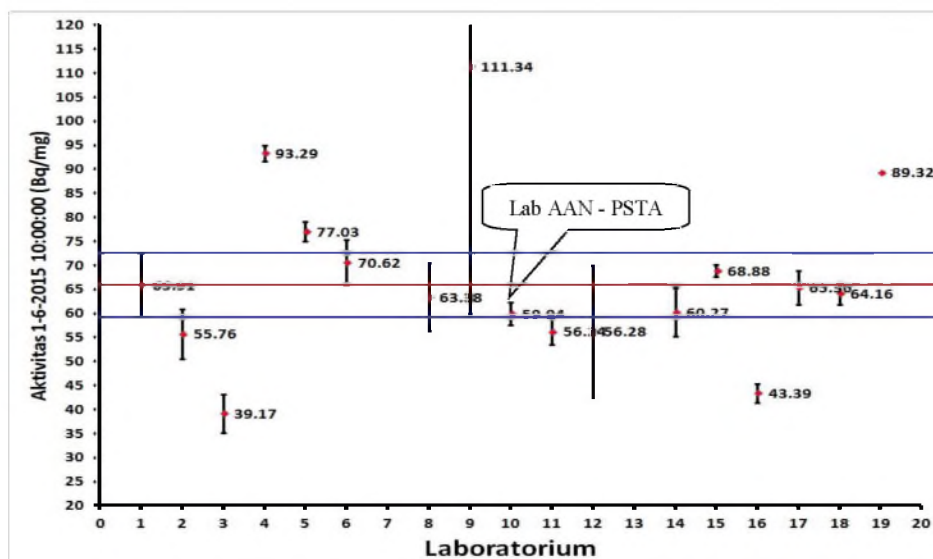
1. Kegiatan uji profesiensi pada pengukuran aktivitas sampel merupakan hal yang sangat penting dalam dunia pengukuran atau metrologi radioaktivitas. Hal ini disebabkan dari hasil pengukuran dapat disimpulkan tingkat kemampuan atau kompetensi tiap laboratorium dan ketertelusuran dengan laboratorium primer lainnya.

**Tabel 2.** Hasil hitung ketidakpastian baku pada analisis Eu-152 (standar) dan I-131 (sampel)

No.	Sumber Ketidakpastian	Nilai	$\mu$	$\mu, \%$	tipe		Ketidakpastian baku	
1	Sumber standar	197500		1,51%	B	1,51/2	$\mu_{SS}$	0,755
2	Umur paruh standar	13,552	0,016	0,1181	B	0,11806/2	$\mu_{UPS}$	0,05903
3	Waktu mati	3,35	5 %	0,1675	B	0,1675/2	$\mu_{WMS}$	0,0837
4	Luas area standar			0,34	A	0,34V3	$\mu_{LAS}$	0,196305
5	Probabilitas	24,72	0,11	0,4450	B	0,44498/2	$\mu_{PS}$	0,22249
6	Efisiensi			0,08	A	0,08/V3	$\mu_{ES}$	0,046189
7	Luas area sampel			1,27	A	1,27V7	$\mu_{LA}$	0,47997
8	Probabilitas	83,1	0,5	0,6017	B	0,60168/2	$\mu_P$	0,30084
9	Umur paruh sampel	8,0233	0,0019	0,0237	B	0,02368/2	$\mu_{UP}$	0,01184
10	Waktu mati sampel			0,02	B	0,02/2	$\mu_{WM}$	0,01
11	Statistik pencacahan	22,189	0,268	1,2078	A	1,20781/V7	$\mu_{SP}$	0,456466

**Tabel 3.** Hasil perhitungan ketidakpastian dan aktivitas sumber I-131

No.	$\mu_C = \sqrt{\mu_{SS}^2 + \mu_{UPS}^2 + \mu_{WMS}^2 + \mu_{LAS}^2 + \mu_{PS}^2 + \mu_E^2 + \mu_{LA}^2 + \mu_F^2 + \mu_{UP}^2 + \mu_{WM}^2 + \mu_{SP}^2}$ Perhitungan ketidakpastian gabungan ( $\mu_C$ ) = 1,0955 %		
1.	Ketidakpastian diperluas (U),	$U = k \cdot \mu_C, k=2$	2,19104 %
2.	Aktivitas I-131 terukur		22,189 Bq
3.	Ketidakpastian diperluas (U)	$22,189 \cdot (2,19104/100)$	0,486 Bq
4.	Aktivitas I-131 (10-07-2015) Jam 14.57.53. WIB		$22,189 \pm 0,486$ Bq

**Gambar 3.** Perbandingan hasil analisis sampel I-131 laboratorium AAN – PSTA dengan 18 laboratorium lainnya

Evaluasi hasil pengukuran aktivitas masing-masing laboratorium dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran tiap laboratorium dengan hasil pengukuran dari laboratorium standarisasi PTKMR. Aktivitas sampel I-131 pada tanggal 01 Juni 2015 adalah  $65,91 \pm 6,591$  Bq/mg.

Hasil pengukuran laboratorium AAN pada tanggal 10 Juli 2015, Jam 14.57.53 WIB adalah  $22,189 \pm 0,486$  Bq, dengan berat sampel 10,951487 mg. Bila hasil pengukuran dikembalikan pada tanggal 01 Juni 2015, maka aktivitas I-131 adalah  $59,94 \pm 2,40$  Bq/mg. Perbedaan hasil pengukuran laboratorium AAN –

PSTA dengan laboratorium primer PTKMR adalah - 9,06 %. Dengan nilai kesalahan < 10% dapat dikatakan bahwa hasil pengukuran sampel I-131 oleh laboratorium AAN – PSTA masih dalam rambu-rambu cukup baik, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi pengukuran radioaktivitas I-131 antar laboratorium di lingkungan BATAN menunjukkan bahwa laboratorium AAN - PSTA memperoleh nilai aktivitas I-131 sebesar  $59,94 \pm 2,40$  Bq/mg pada tanggal 01 Juni 2015, sedangkan hasil pengukuran sebagai acuan adalah  $65,91 \pm 6,591$  Bq/mg. Perbedaan hasil pengukuran sebesar - 9,06 %. Hasil ini masih di dalam rambu-rambu cukup baik untuk pengukuran suatu radioaktivitas yang mempunyai aktivitas rendah dengan waktu paruh yang relative lebih pendek.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr Susilo Widodo yang telah menunjuk laboratorium AAN salah satu peserta uji profesiensi radioaktivitas antar laboratorium di lingkungan BATAN. Prof Dr Agus Taftazani memberi dukungan semangat, Mulyono, Suhardi dan Sutanto. Drs. Gatot Wurdianto, M.Eng dan Drs. Hermawan selaku peserta penyelenggara Uji Profesiensi radioaktivitas tahun 2015.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Standardisasi Nasional SNI ISO/IEC 17025, 2008, *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi*, Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2008.
2. Shahida Waheed, Asma Rahman, Naila Siddique, Shujaat Ahmad, Matthias Rossbach, *Proficiency test exercise on the determination of natural levels of radionuclides in mushroom reference material*, Accred Qual Assur, Vol.12 p. 311–316, 2007.
3. [http://kimia.lipi.go.id/meterologi/UJI\\_PROFISIE](http://kimia.lipi.go.id/meterologi/UJI_PROFISIE) NSI diakses pada tanggal 2 Februari 2016.
4. Claude Bailat, Thierrybuchillier, Yvancaffari, Youcefndjadi, Philippspring, Sybille Estier, Francois Bochud, *Seven years of gamma-ray spectrometry interlaboratory comparisons in Switzerland*, Applied Radiation and Isotopes 68 p. 1256–1260, 2010.
5. Stephen De Mora, Jean-Pierre Villeneuve, Eric Wyse, *An overview of laboratory performance studies conducted by the LAEA for marine pollution studies of metals and organic contaminants*, Accred Qual Assur vol. 12 p.587–592, 2007.
6. Irma Mäkinen, Ulla-Maija Hanste, *Proficiency testing for measurement of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in drinking water*, Accred Qual Assur vol. 14 p.473–476, 2009.
7. IAEA, 2013, *ALMERA Proficiency Test:Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Soil and Water Seibersdorf*, 2013.
8. IAEA, *Worldwide Open Proficiency Test: Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Moss-Soil and Water*, IAEA-CU-2009-03, Vienna, 2012.
9. IAEA, *Report on the Proficiency Test on the Determination of Gamma Emitting Radionuclides in SeaWater*, IAEA-CU-2006-08, Seibersdorf, 2007.
10. IAEA, *Mediterranean Region Proficiency Test on the Determination of Radionuclides in Air Filters*. IAEA-CU-2008-02, Vienna, (2009).
11. Fajarina Budiartiri, Workshop Uji Profisiensi. Komite Akreditasi Nasional (KAN), Bogor, 2012.
12. BDM LABOATORY, Laporan Program Uji Profisiensi (proficiency test) Antar Laboratorium Skema khusus Semester II, Serpong, 2015.
13. Sukirno, Sri Murniasih, Rosidi, *Estimasi Faktor Pengayaan Radioaktivitas Alam Hasil Pembakaran Batubara dari PLTU Paiton*, Prosiding PPI-PDIPTN Buku II halaman 71-76, PTAPB-Batan, Yogyakarta, 2014.
14. Al-Sulaiti. H.A., Regan. P.H., Bradley .D.A., Matthews.M., 2008, *Preliminary determination of natural Radioactivity Level of the State of Qatar using High resolution gamma ray spectrometry*, IX Radiation Physics & Protection Conference. Nasr City-Cairo p. 213-223, 2008.
15. Sukirno dan Samin, *Estimasi Nilai Ketidakpastian Analisis Radioaktivitas Ra-226, Ra-228, Th-228 dan K-40 dalam Cuplikan Sedimen dengan Teknik Spektrometri Gamma*, JURNAL IPTEK NUKLIR GANENDRA Volume 14 Nomor 1, 2011.
16. TECDOC IAEA, *Practical Aspects of Operating a Neutron Activation Analysis Laboratory*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1990.
17. W. F. Bakr and Y. Y. Ebaid, *Quantification of Uncertainties in Gamma Ray Spectrometric Measurements: a Case Study*, Journal of Nuclear and Radiation Physics, Vol. 6, No. 1&2, pp. 55-67, 2011.