

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



VERIFIKASI PENGUKURAN RADIOAKTIVITAS ^{153}Sm MENGUNAKAN *DOSE CALIBRATOR* MULTITYPE

Ligwina Dita Pertiwi¹, Maskur¹, Yanto¹, Nuha Fairusya², Nuri Jannati Wahyu Ekaningsih¹

¹Pusat Riset Teknologi Radioisotop, Radiofarmaka, dan Biosimetri – BRIN
K.S.T. B.J. Habibie, Gedung 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314

²Pusat Riset Veteriner – BRIN

K.S.T. Soekarno, Jl. Raya Jakarta – Bogor KM. 46, Bogor, Jawa Barat, 16911

email: ligw001@brin.go.id

(Naskah diterima: 14–03–2023, Naskah direvisi: 03–07–2023, Naskah disetujui: 27–09–2023)

ABSTRAK

VERIFIKASI PENGUKURAN RADIOAKTIVITAS ^{153}Sm MENGGUNAKAN *DOSE CALIBRATOR* MULTITYPE. Verifikasi pengukuran dilakukan untuk menjaga validitas data hasil pengukuran. Pada penelitian ini telah dilakukan verifikasi pengukuran radioaktivitas ^{153}Sm menggunakan alat *dose calibrator* dengan lima tipe yang berbeda, yaitu *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 300, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5. Parameter verifikasi meliputi akurasi, presisi, kelinieran, *Limit of Detection* (LOD), dan *Limit of Quantification* (LOQ). Pada pengujian akurasi, alat *dose calibrator* Atomlab 300 ditetapkan sebagai alat standar untuk menguji akurasi hasil pengukuran alat yang lain. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa semua alat ukur memiliki *error* akurasi kurang dari 3%, namun setelah dilakukan uji t, ternyata hanya *dose calibrator* Atomlab 400 yang nilai t_{hitung} kurang dari t_{tabel} , sedangkan Atomlab 100, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5 t_{hitung} lebih besar daripada t_{tabel} . Pada uji presisi diperoleh hasil bahwa kelima tipe alat *dose calibrator* memiliki presisi yang baik. Kelima alat tersebut memiliki nilai kelinieran yang baik untuk pengukuran Sm-153 radioaktivitas 20-140 mCi. Nilai LOQ *dose calibrator* Atomlab 100 = 8,48 μCi , Atomlab 300 = 5,08 μCi , Atomlab 400 = 8,66 μCi , Atomlab 500 = 8,78 μCi , dan Capintec CRC-tr5 = 7,23 μCi . Nilai LOD *Dose calibrator* Atomlab 100 = 2,54 μCi , Atomlab 300 = 1,52 μCi , Atomlab 400 = 2,59 μCi , Atomlab 500 = 2,64 μCi , dan Capintec CRC-tr5 = 2,17 μCi . Hal ini menunjukkan bahwa kelima alat tersebut memiliki validitas pengukuran yang baik dengan kepercayaan pengukuran 95%, namun untuk Atomlab 100, 500, dan Capintec CRC-tr5 hasil pengukurannya perlu dikalikan faktor koreksi.

Kata kunci: *Dose calibrator*, verifikasi, radioaktivitas, ^{153}Sm .

ABSTRACT

VERIFICATION OF ^{153}Sm RADIOACTIVITY MEASUREMENTS USING A MULTITYPE DOSE CALIBRATOR. Measurement verification is crucial to ensure measurement results validity. In this study, we have done verification on ^{153}Sm radioactivity using five different types of dose calibrators dose calibrator Atomlab 100, Atomlab 300, Atomlab 400, Atomlab 500, and Capintec CRC-tR5. The parameters of verification process including accuracy, precision, linearity, Limit of Detection (LOD), and Limit of Quantification (LOQ). The dose calibrator Atomlab 300 was established as the standard instrument to examine the others type of dose calibrator accuracy. Verification results showed all the instruments have an error of less than 3%. However, the t-test results exhibited only the dose calibrator Atomlab 400 that had t_{value} less than the corresponding t_{table} value. In contrast, Atomlab 100, Atomlab 500, and Capintec CRC tR5 produced a t_{value} greater than a t_{table} value. In the precision test, all types of dose calibrator gave a satisfactory precision results. All five-dose calibrators demonstrated good linearity for measuring radioactivity within the range of 20-140 mCi. The LOQ values for each dose calibrator were as follows dose calibrator Atomlab 100 = 7,88 μCi , Atomlab 300 = 12,65 μCi , Atomlab 400 = 17,32 μCi , Atomlab 500 = 15,06 μCi , and Capintec CRC tR5 = 18,6 μCi . As well as the LOQ values of the dose calibrator were determined as calibrator Atomlab 100 = 2,74 μCi , Atomlab 300 = 1,14 μCi , Atomlab 400 = 8,2 μCi , Atomlab 500 = 6,79 μCi , and Capintec CRC tR5 = 7,38 μCi . These showed that five dose calibrator types offer reliable measurement validity with a 95% confidence level. Nevertheless, it is necessary to employ a correction factor for Atomlab 100, Atomlab 500, and Capintec CRC tR5.

Keywords: Dose calibrator, verification, radioactivity, ^{153}Sm

PENDAHULUAN

Dose calibrator adalah instrumen yang dibuat untuk mengukur jumlah ion dalam suatu medium. Perangkat terdiri dari ruang yang berisi gas antara dua elektroda penghantar (anoda dan katoda). Ketika gas di antara elektroda terionisasi oleh sinar gamma dari radionuklida, maka ion dan elektron terdisosiasi berpindah ke elektroda yang memiliki polaritas berlawanan, sehingga menciptakan arus ionisasi yang dapat diukur. Setiap ion pada dasarnya menyimpan atau menghilangkan muatan listrik kecil ke atau dari elektroda, sehingga muatan yang terakumulasi sebanding dengan jumlah ion bermuatan serupa [1][2]. *Dose calibrator* secara rutin digunakan untuk mengukur dosis radioaktivitas di instalasi kedokteran nuklir [1] maupun di laboratorium radioisotop radiofarmaka [3].

Dose calibrator merupakan alat yang banyak digunakan di instalasi kedokteran nuklir karena alat tersebut banyak digunakan untuk menentukan jumlah dosis (aktivitas) radiofarmaka yang akan disuntikkan ke pasien [4]. Dosis radioaktivitas dapat digunakan untuk mengetahui konsentrasi radioaktivitas yang juga merupakan parameter penting dalam kendali kualitas radiofarmaka karena berkaitan dengan seberapa banyak volume yang harus disiapkan untuk dikirim ke rumah sakit. Oleh karena itu, perlu dilakukan verifikasi untuk membuktikan validitas hasil pengukuran [5]. Hal tersebut juga merupakan ketentuan yang tertera pada *guidance system* mutu ISO 17025 [6].

Pada penelitian ini, radioisotop yang digunakan untuk verifikasi pengukuran radioaktivitas adalah ^{153}Sm . Radioisotop tersebut dihasilkan dari ^{152}Sm yang diiradiasi di reaktor nuklir melalui reaksi $^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$ [7]. Waktu paruh $^{153}\text{Sm}=19,3$ hari, memancarkan partikel β^- ($E = 808$ keV (18%), 705 keV (50%), 635 keV (32%) sehingga berpotensi sebagai terapi kanker. Selain itu, ^{153}Sm juga memancarkan sinar γ $E=103$ keV, 28% sehingga dapat digunakan untuk pencitraan menggunakan *instrument single photon emission computed tomography* (SPECT) [8][9].

Parameter dari verifikasi metode menurut AOAC di antaranya yaitu akurasi, presisi, spesifitas, LOQ, LOD, kelinieran, dan *ruggedness* [10], namun parameter yang dilakukan pada penelitian ini hanya meliputi uji akurasi, uji presisi, kelinieran, LOQ, dan LOD.

Uji akurasi dilakukan untuk memastikan keakuratan hasil pengukuran. Radioaktivitas akan dibandingkan dengan radioaktivitas hasil pengukuran menggunakan *dose calibrator* yang dijadikan sebagai alat standar. Pada penelitian ini, *dose calibrator* Atomlab 300 ditetapkan sebagai alat standar dengan pertimbangan bahwa *dose calibrator* tersebut telah dikalibrasi oleh Laboratorium Teknologi Keselamatan Metrologi dan Radiasi (LTKMR) dan sering digunakan untuk uji radioaktivitas di Instalasi Radioisotop dan Radiofarmaka (ITRR). Parameter akurasi diperoleh dengan menghitung nilai *%error* menggunakan persamaan (1) berikut.

$$\%error \text{ akurasi} = \frac{A - A_{std}}{A_{std}} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan *%error* akurasi adalah persentase penyimpangan pengukuran, A adalah aktivitas hasil pengukuran dan A_{std} adalah aktivitas menggunakan alat standar. Apabila terdapat penyimpangan, maka untuk mendapatkan hasil pengukuran yang sebenarnya, radioaktivitas harus dikalikan dengan faktor koreksi (FK) yang diperoleh dengan persamaan (2) dan (3) [4]:

$$FK = 1 - error \text{ akurasi} \quad (2)$$

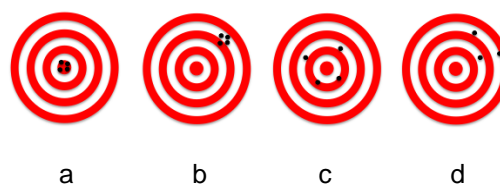
$$A_{true} = AxFK \quad (3)$$

FK : Faktor Koreksi

A_{true} : Aktivitas yang sebenarnya

A : Aktivitas hasil pengukuran

Uji presisi dilakukan dengan menghitung nilai *relative* standar deviasi (RSD) dari hasil pengulangan pengukuran radioaktivitas. Perbedaan antara akurasi dan presisi ditunjukkan pada ilustrasi Gambar 1.



Gambar 1. Definisi akurat dan presisi (a); presisi tapi tidak akurat (b); akurat tapi tidak presisi (c); serta tidak akurat dan tidak presisi (d) [11].

Kelinieran pengukuran radioaktivitas adalah ukuran seberapa linier hubungan antara jumlah zat radioaktif yang diukur dengan radioaktivitas yang terbaca pada alat *dose calibrator*. Hasil beberapa data pengukuran diolah menggunakan regresi linier kuadrat terkecil. Plot yang dihasilkan berupa kemiringan, intersep, dan korelasi koefisien memberikan informasi yang diinginkan pada kelinieran. Nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan kedua parameter sangat linier.

Limit of Quantification (LOQ) adalah batas konsentrasi sampel yang dapat diukur secara kuantitatif oleh alat ukur secara akurat dan presisi. LOQ ditentukan mengikuti persamaan (4) berikut.

$$LOQ = \frac{10 \times SD}{b} \quad (4)$$

LOQ : *Limit of Quantification*

SD : *Standard Deviation*

b : *Slope*

Limit of Detection (LOD) adalah batas konsentrasi analit minimum yang dapat dideteksi alat dengan andal, tetapi tidak harus dikuantifikasi sebagai nilai yang tepat. LOD ditentukan mengikuti persamaan (5) di bawah ini.

$$LOD = \frac{3 \times SD}{b} \quad (5)$$

LOD : *Limit of Detection*

SD : *Standard Deviation*

b : *slope* [12].

METODOLOGI

a. Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini berupa larutan radioisotop ^{153}Sm yang diproduksi di Pusat Riset Teknologi Radioisotop Radiofarmaka dan Biodosimetri (PRTRRB) dari hasil aktivasi neutron ^{152}Sm (n,γ) ^{153}Sm di Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS). Pipet mikro (*Eppendorf Research Plus*), *microtip*, vial, *dose calibrator* Atomlab 100 (*Biodex Medical System, Inc.*), *dose calibrator* Atomlab 300 (*Biodex Medical System, Inc.*), *dose calibrator* Atomlab 400 (*Biodex Medical System, Inc.*), *dose calibrator* Atomlab 500 (*Biodex Medical System, Inc.*), dan *dose calibrator* Capintec CRC-tr5 (*Mirion Technologies*).

b. Metode Verifikasi

b.1. Akurasi

Larutan radioisotop ^{153}Sm dicuplik dan dimasukkan ke dalam vial, diukur menggunakan *dose calibrator* Atomlab 300 dan dicatat radioaktivitasnya. Pengukuran diulang hingga 10 kali. Tahapan kegiatan yang sama dilakukan menggunakan alat *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5. Evaluasi akurasi untuk mengetahui apakah hasil pengukuran tidak ada perbedaan signifikan dilakukan menggunakan uji-t dengan syarat $t_{hitung} < t_{tabel}$. Selain itu, dilakukan perhitungan persentase penyimpangan dan faktor kalibrasi. Syarat keberterimaan pengujian akurasi yaitu nilai *error* yang didapatkan $< 5\%$ [13].

b.2. Presisi

Larutan radioisotop ^{153}Sm dicuplik dan dimasukkan ke vial, selanjutnya diukur menggunakan *dose calibrator* Atomlab 300 dan dicatat radioaktivitasnya. Pengukuran diulang hingga 10 kali. Tahapan kegiatan yang sama dilakukan menggunakan alat *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5. Perhitungan nilai *relative* standar deviasi (RSD) dihitung dengan syarat keberterimaan RSD $< 2\%$ [13].

b.3. Kelinieran

Larutan radioisotop ^{153}Sm dicuplik dan dimasukkan ke vial, ditimbang dan diukur menggunakan *dose calibrator* Atomlab 300 dan dicatat radioaktivitasnya. Proses selanjutnya adalah melakukan pencuplikan dengan volume yang berbeda hingga diperoleh lima data dengan berat yang berbeda, kemudian masing-masing diukur aktivitasnya. Kegiatan ini dilakukan triplo. Proses yang sama dilakukan menggunakan alat *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tRr5. Evaluasi terhadap kelinieran hasil pengukuran masing masing alat dilakukan menggunakan kurva regresi linier dengan syarat keberterimaannya adalah $r^2 > 0,99$ [13].

b.4. Limit of Quantification (LOQ)

Pengukuran radioaktivitas *background* dilakukan menggunakan alat *dose calibrator* Atomlab 100 kemudian dicatat nilai radioaktivitasnya. Pengulangan dilakukan sebanyak 10 kali dan dihitung standar deviasinya. Proses yang sama dilakukan menggunakan *dose calibrator* Atomlab 300, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5. Evaluasi nilai LOQ masing-masing alat dihitung menggunakan persamaan (4).

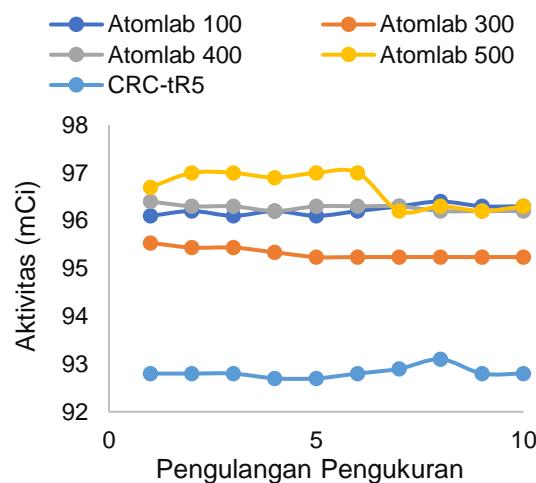
b.5. Limit of Detection (LOD)

Pengukuran radioaktivitas *background* dilakukan menggunakan alat *dose calibrator* Atomlab 100 kemudian dicatat radioaktivitasnya. Pengukuran dilakukan 10 kali pengulangan dan dihitung standar deviasinya. Tahapan yang sama dilakukan menggunakan *dose calibrator* Atomlab 300, Atomlab 400, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5. Evaluasi nilai LOD masing-masing alat dihitung menggunakan persamaan (5).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dose calibrator yang digunakan pada pengujian ini memiliki spesifikasi yang sama, tetapi dengan tipe dan merk yang berbeda. Prinsip kerja kelima *dose calibrator* yaitu ionisasi di dalam *chamber* yang menghasilkan arus yang sebanding dengan radioaktivitas terukur [14]. Pada penelitian ini, aktivitas ¹⁵³Sm yang digunakan yaitu pada rentang 1 µCi – 1400 µCi. Pengujian parameter akurasi, hasil pengukuran radioaktivitas menggunakan *dose calibrator* (yang akan ditentukan akurasinya) akan dibandingkan dengan hasil pengukuran radioaktivitas dari *dose calibrator* standar (*dose calibrator* Atomlab 300) yang telah dikalibrasi menggunakan *Certified Reference Material* (CRM) oleh LTKMR dengan nomor Sertifikat 074/S/KN 04 01/KMR 5.2/10/2021 dan faktor kalibrasi 0,99.

Hasil pengukuran radioaktivitas ¹⁵³Sm ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa hanya *dose calibrator* Atomlab 400 yang hasil pengukurannya mendekati *dose calibrator* standar, sedangkan *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 500 dan Capintec CRC-tr5 hasilnya berbeda. Untuk memastikan apakah terdapat perbedaan signifikan atau tidak, maka perlu dilakukan uji statistik menggunakan uji-t [15] dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Hasil Pengukuran radioaktivitas ¹⁵³Sm.

Tabel 1. Hasil Uji t dengan Hasil Dose Calibrator Atomlab 300 sebagai Pembanding

Tipe Alat	Hasil Uji t		Interpretasi
	t _{hitung}	t _{tabel}	
Atomlab 100	14,68	1,8	Terdapat Perbedaan
Atomlab 400	0,3	1,8	Tidak Terdapat Perbedaan
Atomlab 500	22	1,8	Terdapat Perbedaan
CRC-tr5	44,6	1,8	Terdapat Perbedaan

Pada Tabel 1 ditunjukkan bahwa hasil uji-t *dose calibrator* Atomlab 400 memiliki nilai t_{hitung} < t_{tabel}. Hal tersebut menunjukkan bahwa data hasil pengukuran radioaktivitas menggunakan *dose calibrator* Atomlab 400 memiliki nilai akurasi tinggi (tidak ada perbedaan signifikan). Namun, hasil pengukuran nilai radioaktivitas menggunakan *dose calibrator* Atomlab 100, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5 memiliki nilai t_{hitung} > t_{tabel}. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga alat tersebut memiliki perbedaan hasil pengukuran jika dibandingkan dengan *dose calibrator* standar [16]. Oleh karena itu, agar hasil pengukuran tetap akurat maka perlu dihitung nilai *error* akurasi serta faktor

koreksinya. Hasil perhitungan dua parameter tersebut ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *dose calibrator* Atomlab 400 memiliki nilai *error* akurasi terendah dibandingkan dengan nilai *error* akurasi *dose calibrator* yang lain, sehingga diperoleh nilai faktor koreksi yang rendah. Semakin rendah nilai *error* akurasi berarti semakin mendekati nilai benar (akurat), sehingga faktor koreksinya juga semakin rendah. Secara berurutan, *dose calibrator* yang memiliki akurasi tertinggi hingga terendah adalah *dose calibrator* Atomlab 400, Atomlab 100, Atomlab 500, dan Capintec CRC-tr5.

Tabel 2. Persentase error akurasi dan faktor kalibrasi dose calibrator

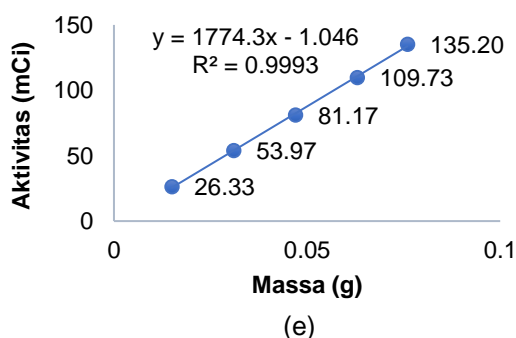
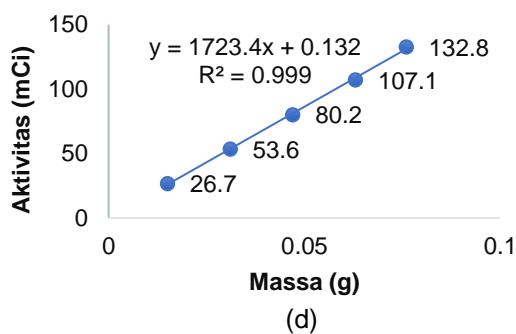
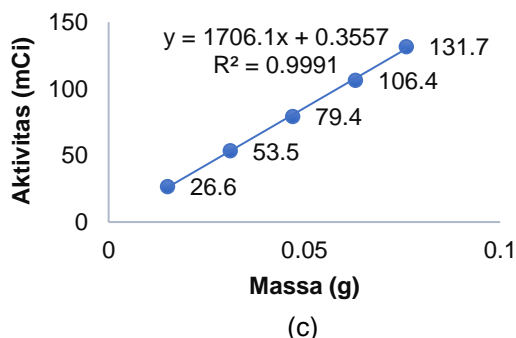
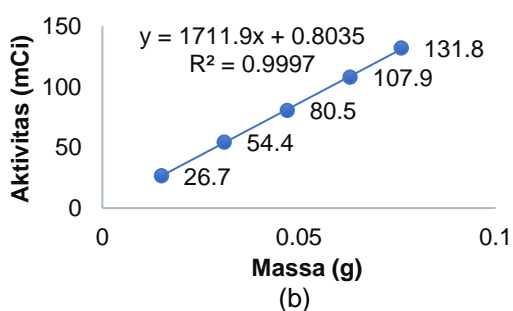
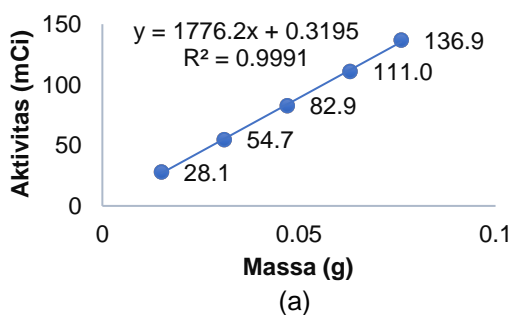
Tipe Dose Calibrator	Error Akurasi (%)	Faktor Koreksi
Atomlab 100	0,95	0,99
Atomlab 400	-0,01	1
Atomlab 500	1,41	0,99
CRC-tr5	-2,62	1,02

Verifikasi presisi dilakukan dengan cara melakukan pengukuran data secara berulang, kemudian dihitung nilai RSDnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil pengukuran dan perhitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai %RSD radioaktivitas ¹⁵³Sm dari berbagai tipe dose calibrator adalah < 2%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran seluruh alat dose calibrator memiliki nilai yang presisi [17][18].

Tabel 3. Uji presisi pengukuran radioaktivitas menggunakan RSD.

Tipe dose calibrator	RSD (%)
Atomlab 100 plus	0,12
Atomlab 300	0,12
Atomlab 400	0,07
Atomlab 500	0,10
Capintec CRC-tr5	0,13

Verifikasi kelinieran dilakukan untuk melihat korelasi antara massa ¹⁵³Sm dan radioaktivitas yang terbaca oleh dose calibrator. Verifikasi kelinieran lima dose calibrator menghasilkan nilai R² > 0,999 pada grafik di Gambar 4., Hal ini berarti bahwa kelima dose calibrator memiliki kelinieran yang cukup baik.



Gambar 4. Grafik kelinieran pengukuran radioaktivitas ¹⁵³Sm untuk dose calibrator Atomlab 100 (a); Atomlab 300 (b); Atomlab 400 (c), Atomlab 500 (d) dan Capintec CRC-tr5 (e)

Verifikasi LOQ dan LOD merupakan hal penting untuk mengetahui batas minimal pengukuran alat. Hasil verifikasi LOQ dan LOD pada masing-masing dose calibrator ditunjukkan pada Tabel 4. Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai LOQ dan LOD antar alat tidak memiliki perbedaan yang terlalu jauh. Nilai LOD dan LOQ yang diperoleh dari perhitungan terlalu kecil, yaitu pada nilai radioaktivitas <10 µCi, sedangkan pengukuran aktivitas biasanya dilakukan pada rentang 20.000 hingga 140.000 µCi. Berdasarkan nilai tersebut, pengukuran radioaktivitas ¹⁵³Sm menunjukkan hasil yang valid jika nilai radioaktivitasnya ≥ LOQ.

Verifikasi Pengukuran Radioaktivitas ^{153}Sm Menggunakan *Dose Calibrator* Multitipe
(Ligwina Dita Pertiwi, Maskur, Yanto, Nuha Fairusya, Nuri Jannati Wahyu Ekaningsih)

Tabel 4. LOQ dan LOD *dose calibrator* untuk mengukur radioaktivitas

Tipe <i>dose calibrator</i>	LOQ (μCi)	LOD (μCi)
Atomlab 100	8,48	2,54
Atomlab 300	5,08	1,52
Atomlab 400	8,66	2,59
Atomlab 500	8,78	2,64
Capintec CRC-tr5	7,23	2,17

Pada kegiatan verifikasi ini, dilakukan juga penetapan ketidakpastian pengukuran

untuk mengetahui rentang kepercayaan dari hasil pengukuran [19]. Perhitungan dilakukan dengan melibatkan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran, meliputi: ketidakpastian alat ukur, skala terkecil pembacaan alat, waktu paro sumber standar, pengukuran radioaktivitas, serta pengaruh pemipetan yang dapat dilihat dalam Tabel 5. Hasil ketidakpastian pengukuran yang diperoleh dari kelima alat *dose calibrator* yaitu 5% dengan rentang kepercayaan sebesar 95%.

Tabel 5. Ketidakpastian Pengukuran Alat

Komponen	U (%)	Pembagi (divider)	u_i	c_i	$u_i c_i$ (%)	$(u_i c_i)^2$ (%)
Ketidakpastian alat ukur	5	2	2,5	1	2,5	6,25
Skala terkecil pembacaan alat	0,0104	1,7321	0,006	1	0,006	0,00004
Umur paro sumber standar	0,0151	1,7321	0,009	1	0,009	0,00008
Pengukuran Radioaktivitas	0,1074	1,4142	0,076	1	0,076	0,00576
Pengaruh pemipetan	0,52	2	0,26	1	0,26	0,0676
Jumlah						6,323
Ketidakpastian baku gabungan						5
Faktor cakupan						2
Ketidakpastian bentangan						5,029

SIMPULAN

Verifikasi pengukuran suatu alat ukur merupakan hal yang harus dilakukan demi menjaga validitas data hasil pengukuran sekaligus untuk mengetahui kinerja alat ukur. Dari hasil verifikasi yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa secara umum seluruh peralatan *dose calibrator* berkinerja baik, yang dapat dilihat dari hasil presisi dan kelinieran yang memenuhi syarat keberterimaan serta nilai LOD dan LOQ yang rendah dengan rentang kepercayaan 95%. Namun, hasil verifikasi akurasi pengukuran menunjukkan bahwa beberapa alat hasilnya berbeda signifikan dengan alat standar, oleh karena itu setiap alat harus dihitung nilai faktor koreksinya dan setiap pengukuran harus dikalikan dengan faktor koreksinya agar hasilnya mendekati nilai benar (akurat).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. M. Begum and M. Rahman, "Study of some essential quality control test for the performance of dose calibrators in nuclear medicine practices," *Int. J. Adv Res (Indore)*, vol. 7, no. April, pp. 279–291, 2019, doi: 10.21474/IJAR01/8632.
- [2]. Nazaroh, "Quality assurance and quality control at dose calibrator to support nuclear medicine services Quality assurance and quality control at dose calibrator to support nuclear medicine services," *Journal of Physics*, vol. 1436, no. Desember, pp. 1–11, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012004.
- [3]. P. Widodo, H. Candra, N. R. Hidayati, and T. S. Humani, " ^{177}Lu effect of geometry factors in radionuclide calibrator Lu effect of geometry factors in radionuclide calibrator," *Journal of Physics*, vol. 1505, no. 012046, pp. 1–4, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1505/1/012046.
- [4]. M. C. Karaca, D. T. Genc, H. Kovan, M. Mulazimoglu, and B. Demir, "Comparative assessment of dose calibrators used in nuclear," *Middle East Journal of Science*, vol. 6, no. 2, pp. 44–56, 2020. doi: 10.23884/mejs.2020.6.2.01.
- [5]. N. Gillings *et al.*, "EANM guideline on the validation of analytical methods for radiopharmaceuticals," *Radiopharm. Chem*, vol. 5, no. 7, pp. 1–29, 2020. doi:10.1186/s41181-019-0086-z.

- [6]. F. Sri, H. Krismastuti, and M. Haekal, "Complying with the resource requirements of ISO / IEC 17025 : 2017 in Indonesian calibration and testing laboratories: current challenges and future directions," *Accreditation and Quality Assurance*, vol. 27, no. 6, pp. 359–367, 2022. doi: 10.1007/s00769-022-01523-w.
- [7]. M. Van De Voorde *et al.*, "Production of sm-153 with very high specific activity for targeted radionuclide therapy," *Front Med (Lausanne)*, vol. 8, no. July, pp.1–9, 2021. doi: 10.3389/fmed.2021.675221.
- [8]. A. Kasbollah *et al.*, "Samarium-153 production using (n, γ) at Triga Puspatri research reactor," in *AIP Conference Proceedings*, AIP, 2020, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0031608>.
- [9]. K. Vermeulen *et al.*, "Exploring the potential of high-molar-activity samarium-153 for targeted radionuclide therapy with [^{153}Sm] Sm-DOTA-TATE," *Pharmaceuticals MDPI*, vol. 14, no. 2566, pp. 1–15, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122566>.
- [10]. N. D. Faridah, D. Erawan, K. Sutriah, A. Hadi, dan F. Budiantari, "Implementasi SNI ISO/IEC 17025:2017 Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi," Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2018.
- [11]. E. Bulut, "Analytic Hierarchy Process (AHP) in maritime logistics: Theory, application and fuzzy set integration," in *International Series in Operations Research & Management Science* 260, pp. 32–77, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-62338-2.
- [12]. B. R. P. Ihsan, I. Maysaroh, I. P. Nurhayati "Validasi metode Ultra High Performance Chromatography Double Mass Spectrometry (UHPLC-MS/MS) untuk analisis kurkumin pada ekstrak kunyit (*curcuma longa*) dengan berbagai perbandingan konsentrasi," *Pharmaceutical Journal of Indonesia*, vol.4, no.1, 2019. doi: 10.21776/ub/pji.
- [13]. Riyanto, "Validasi & verifikasi metode uji sesuai dengan ISO/IEC 17025 laboratorium pengujian dan kalibrasi," 1st ed. Yogyakarta: Deepublish, 2017.
- [14]. Nazaroh, "Quality assurance and quality control at dose calibrator to support nuclear medicine services", in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012004.
- [15]. H. Kim, C. Park, and M. Wang, "Paired t-test based on robustified statistics development of quality control methodologies using bootstrap technique view project bayesian correlation analysis view project paired", 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/329024164>
- [16]. I. Ramadhan and R. Ahdiaty, "Verifikasi metode uji COD secara spektrofotometri UV-Vis untuk low concentration dan high concentration," *Ind. J. Chem. Anal*, vol. 05, no. 01, pp. 52–61, 2022. doi: 10.20885/ijca.vol5.iss1.art6.
- [17]. P. Orhon *et al.*, "Development and validation of analytical methods for radiochemical purity of 177 Lu-PSMA-1", *Pharmaceuticals MDPI*, vol. 15, no. 522, pp. 1–12, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/ph15050522>.
- [18]. S. Velichkova, M. Theunis, T. Naessens, L. Pieters, and K. Foubert, "Development and validation of an HPLC-DAD method for Rapid quantification of vasicine in *Adhatoda vasica* leaves and commercial products," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10226, 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10226.
- [19]. J. G. Salsbury and E. P. Morse, "Measurement uncertainty in the performance verification of indicating measuring instruments", *Precis Eng*, vol. 36, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2012, doi: 0.1016/j.precisioneng.2011.10.001.