

Pengujian Karakteristik Alat Ukur Radiasi *Dose Calibrator* menggunakan Sumber Teknesium-99m dan Cobalt-57 (Sumber Standar) di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahranie Samarinda

Fahira Mutya Mutmainna¹⁾, Retno Zurma²⁾, Pratiwi Sri Wardani³⁾, Erlinda Ratnasari Putri^{4*)}

^{1, 3, 4)} Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Mulawarman
JL Gunung Kelua No.4, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia
²⁾ Instalasi Kedokteran Nuklir, RSUD Abdoel Wahab Sjahranie
JL. Palang Merah No. 1, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia

*E-mail korespondensi: erlinda.putri@fmipa.unmul.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/15439>

Submitted: 24 Januari 2023; Accepted: 10 Maret 2023

ABSTRAK- *Dose Calibrator* adalah salah satu dosimeter yang digunakan untuk mengukur aktivitas radionuklida sebelum diberikan kepada pasien. Agar berfungsi sebagai dosimeter radiasi, *dose calibrator* harus memiliki beberapa sifat dosimeter yang baik, seperti presisi dan kestabilan. Untuk menguji *dose calibrator*, diperlukan sumber yang digunakan oleh rumah sakit. *Dose calibrator* yang digunakan pada Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahranie Samarinda adalah Capintec CRC 25R. Salah satu isotop yang banyak digunakan dibidang kedokteran nuklir, yaitu Tc-99m dan Co-57. Tahapan penelitian kali ini diawali dengan elusi yang dilakukan oleh radiofarmaka, kemudian dilakukan pengukuran aktivitas *background* (latar belakang). Selanjutnya, diukur aktivitas Tc-99m dan Co-57. Lalu, dihitung aktivitas Tc-99m dan Co-57 untuk uji presisi dan kestabilan. Terakhir, dibuat grafik dan mengevaluasi hasil. Berdasarkan hasil penelitian pada uji presisi didapatkan hasil pengukuran sumber Tc-99m diperoleh sebesar 0,305%, sedangkan hasil pengukuran aktivitas sumber standar Co-57 diperoleh sebesar 0,307%. Pada uji kestabilan didapatkan hasil pengukuran sumber Tc-99m diperoleh nilai sebesar 0,563%, sedangkan hasil pengukuran aktivitas sumber standar Co-57 diperoleh nilai sebesar 0,437%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa *dose calibrator* Capintec CRC 25R di A. W. Sjahranie Samarinda memiliki karakteristik dan kinerja yang baik, sehingga hasil pengukuran tersebut dapat dipercaya.

KATA KUNCI: *dose calibrator; kestabilan; presisi*

ABSTRACT- A dose Calibrator is one of the dosimeters used to measure radionuclide activity before being given to patients. In order to function as a radiation dosimeter, the dose calibrator must have several good dosimeter properties, such as precision and stability. To test the dose calibrator, a source used by the hospital is required. The dose calibrator used in Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahranie Samarinda is Capintec 25R. Two of the isotopes are widely used in nuclear medicine, namely Tc-99m and Co-57. The first step of this research was the elution performed by radiopharmaceuticals, then measured background activity. Then, Tc-99m and Co-57 activity were measured. Then, Tc-99m and Co-57 activity were measured for precision and stability tests, finally, graphs were made and evaluated. Based on the research results on the precision test, it was found that the measurement results for the Tc-99m source were obtained at 0.305%, while the result for measuring the activity of the standard Co-57 source was obtained at 0.307%. In the stability test, the result of measuring the Tc-99m source obtained a value of 0.563%, while the result of measuring the activity of the standard Co-57 source obtained a value of 0.437%. It can be concluded that the Capintec CRC 25R in

RSUD A. W. Sjahranie Samarinda has good characteristics and performance so the measurement results can be trusted.

KEYWORDS : *dose calibrator; stability; precision*

PENDAHULUAN

Bidang Kedokteran Nuklir menjadi salah satu penunjang untuk pengobatan dan penyembuhan penyakit kanker (Afismi, 2021). Bidang Kedokteran Nuklir adalah spesialis kedokteran yang menggunakan energi radiasi terbuka dari inti nuklir untuk menilai fungsi organ, mendiagnosis, dan mengobati penyakit kanker (Bapeten, 2012). Alat yang digunakan untuk diagnostik dan terapi adalah *Gamma Scanner* dan *Dose Calibrator*.

Dosimeter radiasi adalah alat instrumen yang mengukur atau mengevaluasi baik secara langsung maupun tidak langsung jumlah radiasi pengion yang terkait. Dosimeter dengan pembacaannya disebut juga sebagai sistem dosimetri. Agar alat radiasi berfungsi sebagai dosimeter radiasi, alat radiasi harus memiliki setidaknya satu sifat fisik yang merupakan fungsi dari kuantitas dosimetri yang diukur dan yang dapat digunakan untuk dosimetri radiasi dengan kalibrasi yang tepat. Agar alat radiasi berfungsi sebagai dosimeter radiasi, alat radiasi harus memiliki setidaknya satu sifat fisik yang merupakan fungsi dari kuantitas dosimetri yang diukur dan yang dapat digunakan untuk dosimetri radiasi dengan kalibrasi yang tepat (Podgorsak, 2004).

Untuk menguji *dose calibrator*, diperlukan sumber yang digunakan oleh rumah sakit. Salah satu isotop yang banyak digunakan di bidang kedokteran nuklir, yaitu Tc-99m dan Co-57. Tc-99m biasanya digunakan untuk mendiagnosis suatu penyakit pada pasien. Tc-99m ini sangat membantu proses diagnosis karena memiliki waktu paruh yang tidak lama, yaitu 6,03 jam. Co-57 adalah salah satu sumber standar di Instalasi Kedokteran Nuklir yang digunakan dalam pemanfaatan teknologi nuklir yang berfungsi sebagai acuan dalam pengukuran radioaktivitas. Co-57 juga memiliki waktu paruh yang cukup lama, yaitu 271,8 hari (Mawar, Astuti, & Febriana, 2020).

Tujuan dilakukannya penelitian ini

adalah untuk mengetahui tingkat presisi dan kestabilan alat ukur radiasi *dose calibrator* menggunakan sumber Tc-99m dan Co-57 (sumber standar) di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahranie Samarinda.

Ada beberapa penelitian sebelumnya yang mengambil tema *dose calibrator*. Aziz (2013) menyatakan bahwa hasil evaluasi *dose calibrator* Capintec CRC 55tR memiliki kinerja yang baik, sehingga hasil pengukuran aktivitas radioisotop Yb-175 menggunakan alat tersebut dapat dipercaya. Penelitian kedua dari Assan, Addison, Hasford, & Sosu (2012) menyatakan bahwa setelah melakukan pengujian akurasi, presisi, reproduktivitas, dan linearitas terhadap kedua *dose calibrator* terdapat perbedaan aktivitas terukur untuk kedua *dose calibrator* sangat kecil. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kedalaman *flood* masing-masing alat radiasi. Assan, Addison, Hasford, & Sosu (2012) menggunakan 3 jenis sumber, yaitu Co-57, Cs-137, dan Tc-99m. Penelitian ini juga menggunakan 2 jenis *dose calibrator* yang berbeda, yaitu Capintec CRC-25R dan VDR-15R. Penelitian ketiga dari Adler & Coyke (2018) telah mendesain *micro dose calibrator* dan mengujinya dengan beberapa uji. Penelitian ini menggunakan sumber Cs-137. Tiga penelitian referensi di atas memberikan hasil yang baik melalui beberapa uji, yaitu uji presisi, dan uji kestabilan.

Adapun sifat-sifat dosimetri radiasi yang digunakan dalam penelitian kali ini yaitu:

Presisi

Kepresisian dari suatu sistem pengukuran adalah suatu pengulangan pengukuran dalam kondisi yang tidak berubah sehingga mendapatkan hasil yang sama (Aziz, 2013). Presisi yang tinggi dikaitkan dengan standar deviasi yang kecil dari suatu pengukuran (Podgorsak, 2004). Nilai presisi yang dipersyaratkan dalam pengukuran aktivitas menggunakan alat radiasi *dose calibrator* sebesar $\pm 1\%$. Untuk menilai presisi pada alat

radiasi dapat menggunakan rumus:

$$\text{Presisi} = \frac{(A_i - \bar{A})}{\bar{A}} 100\% \quad (1)$$

dengan: A_i = aktivitas awal

\bar{A} = aktivitas rata-rata

(Assan, Assan, Addison, Hasford, & Sosu 2012).

Kestabilan

Kestabilan (*constancy*) adalah reproduibilitas alat radiasi dalam mengukur suatu sumber yang konstan selama jangka waktu yang panjang (Aziz, 2013). Nilai kestabilan yang dipersyaratkan dalam pengukuran aktivitas menggunakan alat radiasi *dose calibrator* sebesar $\pm 5\%$.

Untuk menilai kestabilan pada alat radiasi menggunakan rumus:

$$\text{Kestabilan} = \frac{H_{2-n} - H_1}{H_1} \times 100\% \quad (2)$$

dengan: H_1 = Aktivitas referensi hari ke-1

H_{2-n} = Aktivitas hari ke 2-n

n = Banyaknya pengukuran

(Karaca, Tuncman, Kovan, & Mehmet, 2020).

Dose calibrator beroperasi di dalam tabung ionisasi, ini berarti bahwa semua elektron primer dibuat di ruang *dose calibrator* menuju ke anoda tanpa amplifikasi gas. *Dose calibrator* adalah alat instrumen yang jumlah elektronnya mencapai anoda per detik yang diintegrasikan dari waktu ke waktu, sehingga mencapai pembacaan yang stabil selama 1 atau 2 detik (Prekeges, 2009).

Di dalam *dose calibrator* terdapat anoda dan katoda dengan tegangan sekitar 150 Volt (V). Biasanya, ruang ionisasi berisi udara atau gas argon di bawah tekanan tinggi (12 atau lebih atm) yang meningkatkan kemungkinan interaksi sinar gamma dengan gas. *Dipper* digunakan sebagai tempat atau wadah untuk meletakkan sumber ke dalam ruang ionisasi yang berbentuk silinder yang dikelilingi oleh kamar gas. Bagian luar ruangan dilindungi oleh silinder timah yang berguna untuk mencegah sumber radiasi eksternal berkontribusi pada pengukuran dan melindungi area pembulatan dari sumber yang diukur. Perisai ini dapat menyebabkan beberapa sinar gamma terhambur ke dalam kamar gas, yang meningkatkan arus ionisasi saat hadir dibandingkan saat tidak ada.

(Prekeges, 2009). Gambar 1 menampilkan desain *dose calibrator* di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD Abdoel Wahab Sjahranie.



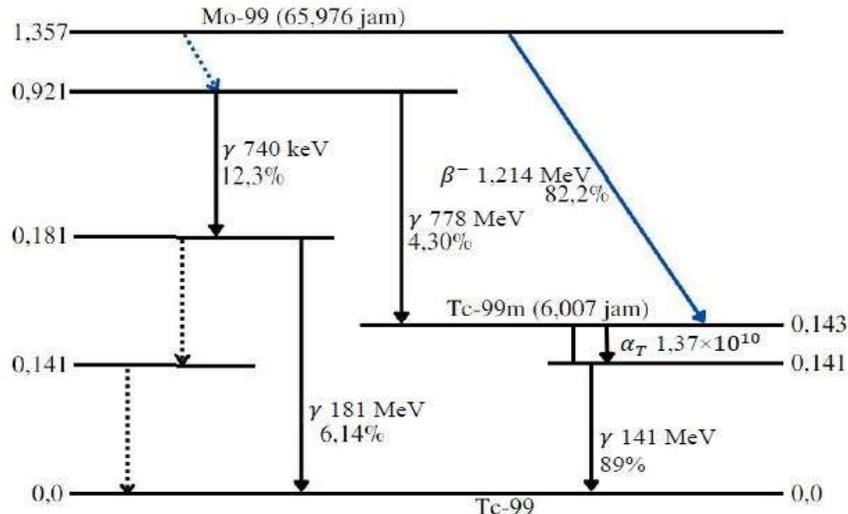
Gambar 1. *Dose calibrator* dengan Pelindung Ruang Ionisasi dengan *Dipper* di Bagian Atas, serta Pembacaan Elektronik

Nuklida Mo-99 adalah isotop dari unsur melibdenum (nomor atom 42, dengan simbol kimia Mo). Ada 99 nukleon dalam inti yang terdiri dari 42 proton dan 57 neutron. Mo-99 bersifat radioaktif dengan waktu paruh 65,976 jam. Warna biru menunjukkan bahwa inti meluruh dengan β^- . Faktanya bahwa Mo-99 meluruh menjadi Tc-99m dengan metastabil tetapi juga ke keadaan dasar Tc-99. Dalam hal ini, nilai Q terhadap peluruhan Tc-99m lebih tinggi, yaitu (Q=0,882 MeV) dibandingkan dengan Q terhadap Tc-99 yang dapat meluruhkan Tc-99m. Mo-99 dicirikan dengan emisi dari beberapa partikel β^- dengan energi titik akhir yang berbeda. Partikel pada energi 1,214 MeV memiliki energi titik akhir tertinggi dan nilai Q tertinggi 82,2%. Transisi ini mengarah ke Tc-99m Secara langsung. Tc-99m memiliki setengah waktu paruh (yaitu=6,007 jam) dan meluruh melalui transisi isomer melalui emisi eketron konversi dan gamma ke Tc-99 (IAEA, 2007).

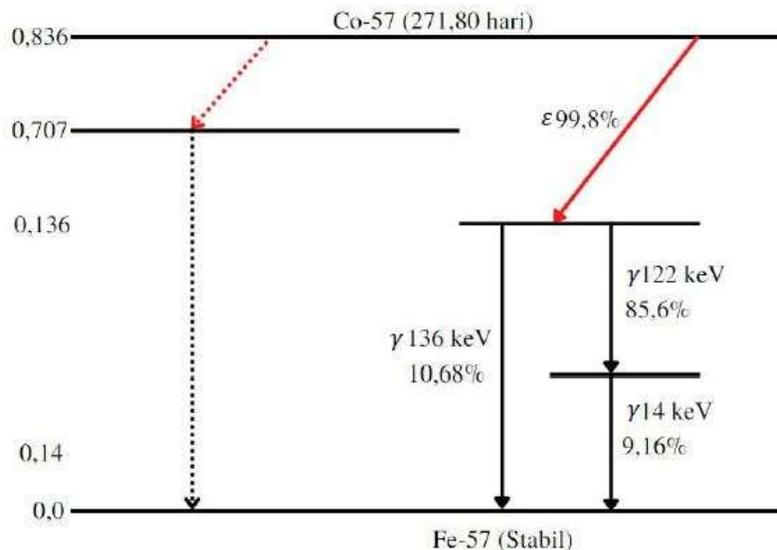
Transisi tambahan dari Mo-99 ditunjukkan melalui penggunaan titik dan mereka mengarah ke keadaan tereksitasi yang berbeda dari Tc-99. Keadaan tereksitasi dari Tc-99 melepaskan energinya melalui emisi gamma yang berbeda. Kemudian, gamma 720

keV emisi dengan probabilitas emisi 12,3% disebabkan oleh transisi dari level tereksitasi pada 0,921 MeV ke level 0,181 MeV. Emisi gamma pada 181 keV dengan probabilitas emisi 6,14% disebabkan oleh transisi dari tingkat tereksitasi pada 0,181 keV ke keadaan dasar. Emisi gamma 778 keV ketiga yang

paling mungkin dikaitkan dengan tingkat tereksitasi pada 0,921 MeV yang mengarah ke Tc-99m (IAEA, 2007). Gambar 2. menampilkan proses peluruhan Teknesium-99m (Tc-99m).



Gambar 2. Peluruhan Teknesium-99m (Tc-99m) (IAEA, 2007).



Gambar 3. Peluruhan Cobalt-57 (Co-57) (IAEA, 2007).

Radionuklida Cobalt-57 (Co-57) ini meluruh melalui tangkapan elektron (*elektron capture EC*). Pada mode peristiwa tangkapan elektron ini, proton berubah menjadi neutron dengan cara menangkap elektron negatif (e^-) dari orbital K atau L dan diikuti dengan pancaran neutrino dan sinar-X. Kulit K atau L yang kosong diisi oleh elektron dengan 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 (Candra, Wurdianto, & Holnisar, 2016).

Warna merah menunjukkan bahwa inti meluruh dengan penangkapan elektron atau emisi positron. Dalam hal ini, semua inti meluruh dengan penangkapan elektron

karena nilai Q , yaitu ($Q=0,836$ MeV) tidak cukup tinggi untuk peluruhan β^+ (energy ambang untuk emisi positron adalah 1,022 MeV). Transisi yang paling mungkin terjadi dari inti Co-57 melalui penangkapan e^- ke keadaan tereksitasi Fe pada nilai Q , yaitu 0,136 MeV. Dari level ini Co-57 terus mengalami peluruhan dengan transisi internal yang memancarkan γ foton dengan energi 122 keV (85,6%) dan 14 keV, atau melalui emisi foton 136 keV (10,68%) yang mengarah langsung ke *ground state* Fe-57. Simbol (e^-) menunjukkan bahwa transisi dari level pada 140 keV didominasi melalui penangkapan elektron (koefisien konversi T adalah 8,56) (IAEA, 2007). Gambar 3 menampilkan proses peluruhan Cobalt-57 (Co-57).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan rancangan penelitian kuantitatif, yaitu menganalisis hasil pengukuran pada sumber Tc-99m dan Co-57 dengan menggunakan uji presisi dan uji kestabilan. Pengambilan data penelitian ini di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahranie Samarinda. Alat yang digunakan adalah *dose calibrator* Capintec CRC-25R dan *dipper*. Bahan yang digunakan adalah Tc-99m dan Co-57.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah elusi yang dilakukan oleh radiofarmaka. Kemudian, dilakukan pengukuran aktivitas *background*. Selanjutnya, diukur aktivitas Tc-99m dan Co-57. Lalu, dihitung aktivitas Tc-99m dan Co-57 untuk uji presisi dan kestabilan. Terakhir, dibuat grafik dan dilakukan evaluasi hasil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Radionuklida yang digunakan pertama pada penelitian kali ini yaitu, Teknesium-99m (Tc-99m). Radionuklida ini bersifat cair yang dimasukkan ke dalam jarum suntik. Sebelum melakukan pengukuran terlebih dahulu melakukan elusi yang dilakukan oleh radiofarmaka. Gambar 4 di bawah ini adalah salah satu sumber radionuklida Tc-99m yang digunakan pada penelitian.

Presisi dari suatu sistem pengukuran adalah sejauh mana pengukuran yang

dilakukan berulang tetap dalam kondisi yang sama dan mendapatkan hasil yang sama. Presisi dalam suatu pengukuran ditentukan dengan menggunakan sumber yang memiliki waktu paruh yang panjang. Penentuan presisi dilakukan untuk mengetahui kestabilan elektrometer dan tekanan gas di dalam *chamber*, sehingga memberikan hasil pengukuran yang reproduibilitasnya tinggi (Aziz, 2013). Nilai presisi yang dipersyaratkan dalam pengukuran aktivitas menggunakan alat radiasi *dose calibrator* sebesar $\pm 1\%$ (Assan, Addison, Hasford, & Sosu 2012)



Gambar 4.1 Salah satu sumber radionuklida Tc-99m

Kestabilan (*constancy*) adalah reproduibilitas dalam mengukur suatu sumber yang konstan selama jangka waktu yang panjang. Reprodusibilitas ditentukan dengan menggunakan sumber yang memiliki waktu paruh yang panjang (Aziz, 2013). Nilai kestabilan yang dipersyaratkan dalam pengukuran aktivitas menggunakan alat radiasi *dose calibrator* sebesar $\pm 5\%$ (Karaca, Tuncman, Kovan, & Mehmet, 2020).

Tabel 1. Data Sumber Radionuklida Tc-99m untuk Uji Presisi

Pengambilan data ke-n	aktivitas rata-rata (mCi)	Presisi (%)
1	2,31	-0,431
2	2,30	-0,862
Rata-rata	2,32	

Berdasarkan Tabel 1 hasil sumber Tc-99m diperoleh presisi sebesar 0,305%. Berdasarkan hasil tersebut, *dose calibrator* Capintec CRC 25R untuk sumber Tc-99m memiliki presisi yang tinggi dan memenuhi batas nilai *error* yang dipersyaratkan, yaitu $\pm 1\%$. Maka dari itu, *dose calibrator* Capintec CRC 25R dapat digunakan untuk mengukur sumber secara berulang dalam kondisi yang tidak berubah dan mendapatkan hasil yang sama.

Tabel 2. Data Sumber Radionuklida Tc-99m untuk Uji Kestabilan

PENGAMBILAN DATA KE-N	AKTIVITAS RATA-RATA (mCi)	KESTABILAN (%)
1	2,36	Referensi
2	2,35	-0,424
3	2,33	-1,271
4	2,32	-1,695
5	2,35	-0,424
6	2,35	-0,424
7	2,33	-1,271
Rata-rata	2,34	

Berdasarkan Tabel 2 yang merupakan data sumber Tc-99m untuk uji kestabilan pada aktivitas rata-rata mengalami fluktuasi (naik turun).

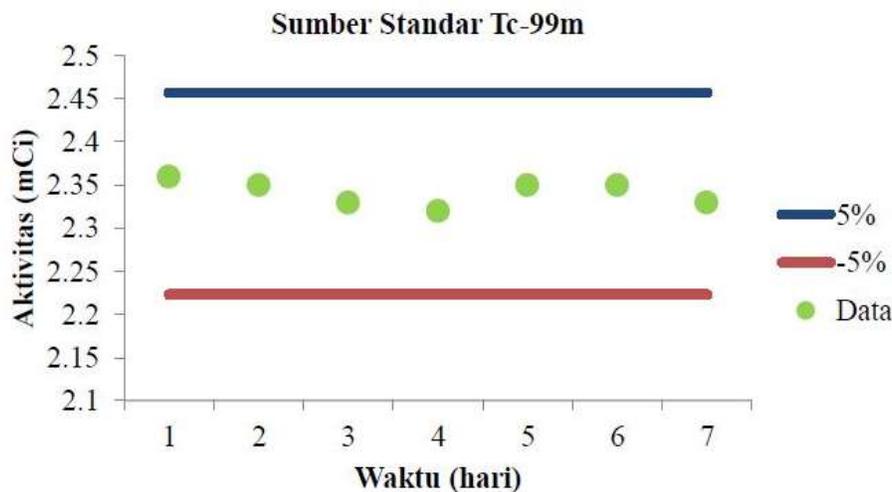
Radionuklida kedua yang digunakan pada penelitian ini, yaitu sumber standar

radionuklida Cobalt-57 (Co-57). Radionuklida ini bersifat padat, berwarna *orange* dan memiliki aktivitas sebesar 5,590 mCi atau 206,8 MBq yang ditempatkan di dalam *container*. Radionuklida ini memiliki waktu paruh 271,8 hari. Radionuklida ini pertama kali digunakan pada 1 Januari 2019 dan penelitian kali ini digunakan pada 20 September 2022. Gambar 5 di bawah ini menampilkan sumber standar radionuklida Co-57.

Pada penelitian kali ini, penulis menggambarkan hasil uji kestabilan menggunakan grafik. Gambar 6 menampilkan grafik uji kestabilan untuk sumber Tc-99m.



Gambar 5. Sumber standar radionuklida Co-57



Gambar 6. Grafik Uji Kestabilan untuk Sumber Tc-99m

Berdasarkan Gambar 6 diperoleh grafik uji kestabilan untuk sumber Tc-99m. Nilai aktivitas grafik pada sumber Tc-99m untuk uji kestabilan berada pada kisaran 2,23 mCi

sampai dengan 2,45 mCi. Ketujuh data aktivitas tersebut didapatkan berada dalam kisaran parameter yang ditetapkan referensi, yaitu $\pm 5\%$.

Hasil pengukuran sumber Tc-99m diperoleh nilai kestabilan sebesar 0,563%. Berdasarkan hasil tersebut, ini menunjukkan bahwa *dose calibrator* Capintec CRC 25R untuk kedua sumber memiliki kestabilan yang tinggi dan memenuhi batas nilai *error* yang dipersyaratkan, yaitu $\pm 5\%$. Maka dari itu *dose calibrator* Capintec CRC 25R dapat digunakan dalam mengukur sumber yang konstan selama jangka waktu yang panjang.

Tabel 3. Data Sumber Radionuklida Co-57 untuk Uji Presisi

PENGAMBILAN DATA KE-N	AKTIVITAS RATA- RATA (mCi)	KESTABILAN (%)
1	0,226	0,534
2	0,225	0,089
3	0,225	0,089
4	0,225	0,089
5	0,224	-0,356
6	0,225	0,089
7	0,224	-0,356
RATA-RATA	0,2248	

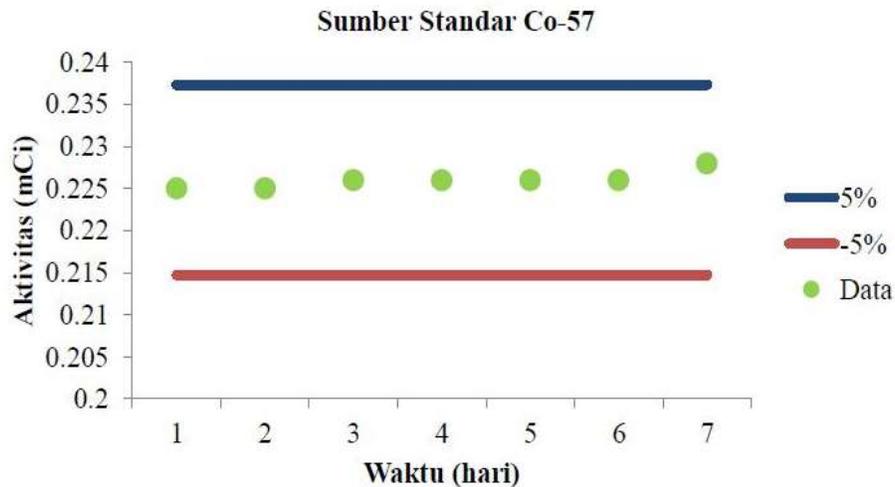
Berdasarkan Tabel 3 hasil sumber Co-57 diperoleh presisi sebesar 0,307%. Berdasarkan

hasil tersebut, *dose calibrator* Capintec CRC 25R untuk sumber Tc-99m memiliki presisi yang tinggi dan memenuhi batas nilai *error* yang dipersyaratkan, yaitu $\pm 1\%$. Maka dari itu, *dose calibrator* Capintec CRC 25R dapat digunakan untuk mengukur sumber secara berulang dalam kondisi yang tidak berubah dan mendapatkan hasil yang sama.

Tabel 4. Data Sumber Radionuklida Co-57 untuk Uji Kestabilan

PENGAMBILAN DATA KE-N	AKTIVITAS RATA- RATA (mCi)	KESTABILAN (%)
1	0,225	Referensi
2	0,225	0,000
3	0,226	0,445
4	0,226	0,445
5	0,226	0,445
6	0,226	0,445
7	0,228	1,333
Rata-rata	0,226	

Berdasarkan Tabel 4 yang merupakan data sumber Co-57 untuk uji kestabilan pada aktivitas rata-rata mengalami fluktuasi (naik turun). Gambar 7 menampilkan grafik uji kestabilan untuk sumber Co-57.



Gambar 7. Grafik Uji Kestabilan untuk Sumber Co-57

Berdasarkan Gambar 7 diperoleh grafik uji kestabilan untuk sumber Co-57. Nilai aktivitas grafik pada sumber Co-57 untuk uji kestabilan berada pada kisaran 0,215 mCi sampai dengan 0,233 mCi. Ketujuh data aktivitas tersebut didapatkan berada dalam kisaran parameter yang ditetapkan referensi, yaitu $\pm 5\%$.

Hasil pengukuran sumber Co-57 diperoleh nilai kestabilan sebesar 0,437%. Berdasarkan hasil tersebut, ini menunjukkan bahwa *dose calibrator* Capintec CRC 25R untuk kedua sumber memiliki kestabilan yang tinggi dan memenuhi batas nilai *error* yang dipersyaratkan, yaitu $\pm 5\%$. Maka dari itu *dose calibrator* Capintec CRC 25R dapat digunakan

dalam mengukur sumber yang konstan selama jangka waktu yang panjang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa Pengujian karakteristik alat radiasi *dose calibrator* menggunakan kedua sumber diperoleh presisi yang tinggi sebesar 0,305% (sumber Tc-99m) dan 0,307% (sumber standar Co-57). Berdasarkan hasil evaluasi, *dose calibrator* Capintec CRC 25R memiliki karakteristik dan kinerja yang baik, sehingga hasil pengukuran tersebut dapat dipercaya. Pengujian karakteristik alat radiasi *dose calibrator* menggunakan kedua sumber diperoleh kestabilan yang tinggi sebesar 0,563% (sumber Tc-99m) dan 0,437% (sumber standar Co-57). Berdasarkan hasil evaluasi, *dose calibrator* Capintec CRC 25R memiliki karakteristik dan kinerja yang baik, sehingga hasil pengukuran tersebut dapat dipercaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Program Studi Fisika, Universitas Mulawarman, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam dan RSUD A. W. Sjahranie yang telah mengizinkan melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adler, S., & Coyke, P. (2018). *Design and Performance of the*. 41(4), 1436–1440. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aadb3b>
- Afismi. (2021). *Aliansi Fisikawan Medik Indonesia (AFISMI)*. <https://www.afismi.org/tentang-fisika-medis>
- Assan, B., Addison, E., Hasford, F., & Sosu, E.

(2012). Calibration and Effective Use of a Dose Calibrator. *International Journal of Science and Technology*, 2(6), 395–400.

- Aziz, A. (2013). Evaluasi Kinerja Dose Calibrator Capintec CRC-55 tR untuk Pengukuran Aktivitas Radioisotop Yb-175. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir*, 53–60.
- Bapeten. (2012). jdih.bapeten.go.id.
- Candra, H., Wurdianty, G., & Holnizar. (2016). Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi. *Batan*, 18(1), ISSN 1410-4652.
- IAEA. (2007). *Decay Shcemes*. 137, 1–25.
- Karaca, M. C. (2020). Comparative Assesment of Dose Calibrators Used in Nuclear Medicine. *Middle East Journal of Science*, 6(2), 44–56. <https://doi.org/10.23884/mejs.2020.6.2.01>
- Mawar, M., Astuti, S. D., & Febriana, S. (2020). Deteksi Karakteristik Peluruhan Radionuklida Medis 99Mo Untuk Memperoleh 99mTc Menggunakan Spektrometer Gamma dengan Sumber Standar Cair Campuran 133Ba dan 152Eu. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(2), 96. <https://doi.org/10.22146/jfi.v24i2.54405>
- Podgorsak. (2004). Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 5(3), 91–92. <https://doi.org/10.1120/jacmp.2021.25315>
- Prekeges, J. (2009). Nuclear Medicine Instrumentation. In *Medical Devices and Systems*. Jones & Bartlett Learning.