



Evaluasi Alat Dosimeter Berdasarkan Penggunaan Radionuklida di Kedokteran Nuklir pada Kedokteran Nuklir

Lisa Widianti^{1*}, Devi Marta¹, Gusti Annisa Nur Lathiifa¹, dan Erlinda Ratnasari Putri¹

¹Program Studi Fisika FMIPA Universitas Mulawarman
Jl. Barong Tongkok No. 4, Samarinda 70123, Kalimantan Timur, Indonesia

*E-mail korespondensi: lisawidianti10@gmail.com

Article Info:

Received: 09-12-2024

Revised: 20-12-2024

Accepted: 05-05-2025

Keywords:

Dosimeters, Radionuclides,
Nuclear medicine



Abstract

Radionuclides are widely used in nuclear medicine for both diagnostic and therapeutic purposes, offering significant benefits in identifying and treating various medical conditions. However, precise measurement of radiation dose is essential to ensure the safety of patients and medical personnel involved in these procedures. Uncontrolled or excessive radiation exposure can result in harmful biological effects, including tissue damage and increased long-term risks such as cancer. Accurate dose measurement is therefore critical for balancing the benefits of radionuclide use with its potential risks. Dosimeters play a vital role in measuring and evaluating radiation exposure. This article provides a comprehensive review of various dosimeters commonly used in nuclear medicine, including Thermoluminescent Detectors (TLD), Optically Stimulated Luminescence Dosimeters (OSLD), and Radiochromic films (Gafchromic EBT3). Each type of dosimeter is discussed in detail, highlighting their working principles, advantages, disadvantages, and performance. TLD is widely utilized for personal dose measurements due to its reliability and accuracy, while OSLD is effective for monitoring environmental exposure in the workplace, and Gafchromic EBT3 film offers unique advantages in visualizing dose distribution during radiation therapy. The review emphasizes the strengths and limitations of these technologies and underscores the importance of continuous innovation in dosimetry to enhance accuracy, efficiency, and safety. Emerging technologies such as real-time dosimeters and advanced materials are briefly discussed as potential solutions to existing challenges. This review aims to serve as a practical guide for researchers, healthcare providers, and industry professionals in selecting appropriate dosimetry tools while encouraging efforts to develop better technologies for safer and more effective nuclear medicine practices.

PENDAHULUAN

Radionuklida memiliki peran yang sangat penting, terutama dalam bidang kedokteran nuklir. Salah satu aspek utama dalam penelitian ini adalah dosimetri, yaitu pengukuran dosis radiasi yang diterima oleh tubuh secara akurat. Alat dosimeter menjadi bagian yang tak terpisahkan karena hasil pengukurannya secara langsung memengaruhi analisis distribusi radionuklida di tubuh dan penilaian keselamatan paparan radiasi. Meski begitu, alat dosimeter yang tersedia saat ini tidak luput dari keterbatasan. Faktor-faktor seperti akurasi, sensitivitas terhadap jenis radiasi tertentu, dan kemampuan teknologinya sering kali menjadi tantangan dalam memilih alat yang tepat untuk kebutuhan penelitian. Hal ini membuat evaluasi alat dosimeter menjadi sangat penting agar hasil penelitian tetap relevan dan dapat dipercaya.

Artikel ini akan mengulas berbagai jenis alat dosimeter yang biasa digunakan dalam penelitian radionuklida. Ulasan ini akan membahas kelebihan, kekurangan, serta kinerja masing-masing alat dengan tujuan memberikan panduan yang jelas bagi peneliti dan pembaca. Selain itu, artikel ini juga akan mengidentifikasi peluang pengembangan teknologi dosimetri yang dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi di masa depan. Artikel ini juga akan meninjau penelitian terdahulu yang membahas penggunaan dosimeter dalam kedokteran nuklir, termasuk studi tentang akurasi alat untuk berbagai jenis radiasi, seperti yang dilakukan oleh Olivier et al. (2022). Penelitian-penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk mengevaluasi performa dan pengembangan teknologi dosimetri.

Dose Calibrator

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. 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[1].

Dose calibrator beroperasi di dalam tabung ionisasi, ini berarti bahwa semua elektron primer dibuat di ruang *dose calibrator* menuju ke anoda tanpa amplifikasi gas. 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[1].

Thermoluminescent Detectors (TLD)

Dosimeter cincin hampir secara eksklusif menggunakan TLD berbasis *Lithium fluoride* (LiF). Beberapa jenis LiF TLD memiliki perbedaan sensitivitas, ketergantungan energi, dan volume sensitif. Dosimeter berfungsi untuk mengukur paparan radiasi dari radionuklida dengan prinsip kerja mendeteksi radiasi ionisasi yang dipancarkan, seperti partikel beta (β), sinar gamma, atau positron (β^+), yang dihasilkan oleh peluruhan radionuklida seperti F-18, Ga-67, Tc-99m, N-13, dan I-123. Pada TLD, radiasi dari radionuklida berinteraksi dengan material sensitif, seperti kristal *lithium fluoride* (LiF), yang menyimpan energi radiasi dalam bentuk elektron tereksitasi. Ketika TLD dipanaskan, energi tersebut dilepaskan sebagai cahaya dengan intensitas sebanding dosis radiasi yang diterima. Cahaya ini diukur, dikalibrasi menggunakan sumber standar seperti Cs-137, lalu dikonversi menjadi dosis dalam milisievert (mSv), memungkinkan evaluasi paparan radiasi secara akurat [2].

Untuk mengukur dosis radiasi yang diterima oleh personel di departemen nuklir medis. TLD, khususnya TLD-100 berbasis *Lithium fluoride*, digunakan untuk menentukan nilai dosis ekuivalen dari paparan radiasi yang dialami oleh ekstremitas tenaga medis. Alat ini berfungsi dengan menyimpan energi dari radiasi yang diterima dan kemudian melepaskannya dalam bentuk cahaya saat dipanaskan, yang memungkinkan pengukuran dosis radiasi dengan akurasi

yang tinggi. TLD juga membantu dalam kalibrasi dan analisis data radiasi, memastikan bahwa paparan radiasi dapat dipantau dan dievaluasi dengan baik untuk menjaga keselamatan tenaga kerja di lingkungan berisiko tinggi[2].

TLD mengukur dosis radiasi yang diterima oleh ponsel dan *phantom* manusia selama eksperimen iradiasi dengan isotop Iridium-192 (^{192}Ir). TLD digunakan sebagai dosimeter referensi untuk membandingkan hasil dari berbagai teknik dosimetri dan mengevaluasi distribusi dosis radiasi di seluruh permukaan tubuh. Selain itu, TLD berperan dalam kalibrasi dosis dengan mengukur intensitas sinyal TL setelah iradiasi, yang kemudian dikonversi menjadi dosis setara dengan radiasi dari sumber tertentu. Dengan kalibrasi individual, TLD membantu meminimalkan ketidakpastian dalam pengukuran, sehingga menghasilkan data dosis yang lebih akurat dan dapat diandalkan[3].

Radiochromic film (Gafchromic EBT3)

EBT3 film dosimeter merupakan *film radiochromic* yang digunakan untuk verifikasi dosis dalam terapi radiasi, khususnya pada aplikasi Sr-90 dan Y-90 *applicator*. Prinsip kerjanya melibatkan perubahan warna film ketika terpapar radiasi, yang dapat diukur berdasarkan intensitas warna yang berubah. Ketika film EBT3 terpapar radiasi dari Sr-90 dan Y-90, film akan mengalami perubahan warna sesuai dengan dosis yang diterima, yang kemudian dianalisis untuk menentukan distribusi dosis. Dosis tertinggi terdeteksi di permukaan dan menurun eksponensial pada kedalaman, memungkinkan visualisasi distribusi dosis dengan akurat[4].

Film *radiochromic* menawarkan sensitivitas dalam kisaran dosis 0,1 – 10 Gy. Film ini terdiri dari lapisan aktif, dengan ketebalan nominal 28- μm , yang diapit di antara dua substrat poliester 125- μm . Ketika film EBT3 terpapar radiasi pengion, film ini bereaksi membentuk polimer berwarna biru dengan penyerapan maksimum sekitar 635 nm. Nomor atom efektif (Z_{eff}) dari lapisan aktif film ini adalah 7,26, yang mendekati Z_{eff} air (7,42). Resolusi spasial adalah sub-mm apabila dibaca oleh pemindai *flatbed* konvensional. Radionuklida seperti Y-90, dan Lu-177 semakin banyak digunakan dalam terapi radionuklida bertarget[4].

Optically Stimulated Luminescence Dosimeters (OSLD)

OSLD adalah perangkat kecil berbentuk persegi yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi yang diserap oleh suatu lingkungan atau individu. Alat ini terbuat dari aluminium oksida yang didoping karbon oksida (Al_2O_3). Mereka berukuran kecil dan dapat digunakan dalam rentang diagnostik dan terapeutik radiasi dosis dan energi sinar [5]. OSLD, dengan material utama berbasis Uranyl MOF (*Metal-Organic Framework*). Prinsip kerja dosimeter ini melibatkan interaksi antara radiasi ionisasi dari radionuklida (Sr-90/Y-90 untuk beta radiasi dan Co-60 untuk gamma radiasi) dengan material MOF. Ketika material tersebut terkena radiasi, pasangan *electron-hole* terbentuk dan terperangkap di cacat kristal dalam struktur MOF. Selanjutnya, ketika material ini distimulasi dengan cahaya tertentu, elektron yang terperangkap dilepaskan dan berkombinasi dengan *hole*, menghasilkan emisi cahaya. Intensitas cahaya yang dihasilkan sebanding dengan dosis radiasi yang diserap, memungkinkan pengukuran dosis secara akurat [6].

Ionization Chamber Dosimeter

Ionization Chamber merupakan alat yang bekerja dengan mendeteksi radiasi melalui ionisasi gas dalam ruang tertutup. Ketika radiasi dari radionuklida seperti Tc-99m atau I-131 melewati bilik, partikel gamma atau betanya menyebabkan ionisasi molekul gas. Ion positif dan elektron bebas yang terbentuk bergerak menuju elektroda berlawanan yang dialiri tegangan listrik, menghasilkan arus listrik yang dapat diukur. Tingkat arus listrik ini sebanding dengan

intensitas radiasi yang masuk, sehingga memungkinkan pengukuran dosis radiasi secara akurat dalam satuan seperti $\mu\text{Sv/h}$. Bilik ionisasi sangat efektif untuk mengukur radiasi energi tinggi seperti gamma[7].

METODE

Penelitian ini menggunakan data skunder yang didasari pada studi literatur artikel sebanyak 15 artikel. Studi literatur dilakukan selama 2 bulan, dimulai dari proses identifikasi artikel, seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, hingga analisis isi artikel. Artikel yang digunakan dibatasi pada pembahasan tentang alat dosimeter dalam bidang Kedokteran Nuklir. Artikel yang dikaji diambil dari rentang tahun 2020 hingga 2024 untuk memastikan bahwa informasi yang digunakan bersifat mutakhir dan sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan di bidang ini. Selanjutnya artikel tersebut dibandingkan agar sesuai dengan hasil yang diharapkan, yaitu untuk mengetahui dosimeter mana yang lebih baik pada kedokteran nuklir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 berikut ini adalah ringkasan perbandingan berbagai penelitian yang membahas penggunaan jenis-jenis dosimeter dalam kedokteran nuklir. Tabel ini menyajikan informasi penting, seperti jenis dosimeter yang digunakan dan jenis jenis radionuklida yang digunakan. Bagian ini menyajikan hasil penelitian beserta pembahasan yang dilakukan oleh para penulis. Pembahasan yang dilakukan dapat berupa hasil pengolahan data, interpretasi penemuan secara ilmiah dan logis, komparasi dengan penelitian sejenis lainnya, atau proyeksi dampak dari penelitian.

Tabel 1. Perbandingan Dosimeter dan Radionuklida yang digunakan pada Bidang Kedokteran Nuklir

Dosimeter dan Radionuklida	Metode	Hasil	Referensi
OSLD dengan radionuklida F-18	Pengukuran dosis radiasi di area PET/CT menggunakan dosimeter OSL (Optically Stimulated Luminescence).	Dosis radiasi tertinggi di area terkontrol ditemukan di ruangan PET/CT 1 sebesar 21,72 mSv/tahun.	[13]
OSLD dengan radionuklida Ra - 223 Lu-177, dan Y-90	Eksperimen OSL dan Radionuklida terapeutik Kemudian <i>Pre-treatment dosimetry</i> dan <i>Radioembolization</i>	Linier hingga 100 Gy, MDD 1,1 Gy, tidak ada optimasi dosis, optimalisasi 25% kasus, optimasi 96% dan verifikasi 65%.	[10]
<i>Ionization Chamber</i> Dosimeter dengan radionuklida Tc-99m dan I-131	Pengukuran dosimetri dengan simulasi Monte Carlo	Efisiensi pelindung 50,86% – 99,5% tergantung jenis pelindung, efisiensi 66,5%; optimal pada timbal	[7]

		11 – 28 mm (90,6% – 99%), hasil simulasi), dan Ketebalan timbal 11 – 28 mm efisien (90,6% – 99%); 43 mm mencapai efisiensi 99,79%	
Dose calibrator Capintec CRC-25R dengan radionuklida Tc- 99m dan Co-57	Analisis hasil pengukuran pada sumber Tc-99m dan Co- 57 dengan uji presisi dan uji kestabilan.	Tc-99m 0,563%; Co- 57 0,437%. kedua sumber memiliki kestabilan yang tinggi dan memenuhi batas nilai error yang dipersyaratkan, yaitu $\pm 5\%$.	[1]
TLD dengan radionuklida F- 18, Ga-67, Tc- 99m, N-13, dan I- 123	TLD dikalibrasi dengan sinar foton seragam dari sumber Cs- 137, perhitungan menggunakan faktor koreksi elemen (ECF) dan faktor kalibrasi pembaca (RCF)	Hasil pengukuran dosis radiasi ekstremitas tahunan dengan rata-rata dosis pada grup 1 adalah $6,24 \pm 4,28$, mSv (rentang 1,1 – 11,7), pada grup 2 $55,45 \pm 7,85$, mSv (rentang 49,9 – 61), dan grup 3 adalah $221,45 \pm$ $18,03$, mSv (rentang 208,7 – 234,2) semuanya di bawah batas tahunan 500 mSv.	[3]
OSLD dengan radionuklida Iodium-131	Memonitor paparan radiasi dan mengukur akumulasi radiasi dari terapi I-131	Paparan radiasi mencapai $7,24 \mu\text{Sv}/\text{jam}$, akumulasi radiasi tahunan melampaui batas ICRP	[14]
OSLD dengan radionuklida I-131 dan Tc- 99m	Memindai tulang, seluruh tubuh dan sisanya pemindaian tiroid.	Rata-rata aktivitas 740 MBq (20 mCi dari Tc-99m-MDP) dan 185 MBq (5 mCi dari Tc-99m pertechnate).	[5]

OSLD dengan radionuklida Tc-99m, I-123, dan F-18	Menggunakan Prism 6 v. 6.0 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, USA)	% CV < 5,0%, berasal dari dosimeter lensa mata DOSIRIS dan VISION. Rata-rata \pm SD dari nanoDot adalah $1,80 \pm 0,03$; CV sebesar 1,52%	[6]
TLD dengan radionuklida Lu-177, Ga-68 dan I-131, Lu-177	Jarum suntik diisi hingga 6 ml dengan larutan berair yang mengandung Lu-177, Ga-68 atau I-131.	Ketebalan spuit 1,25 mm kontribusi elektron terhadap dosis dapat diabaikan; ketebalan spuit 0,63 mm elektron berkontribusi sekitar 13% terhadap dosis; dosis yang diserap di lapisan atas 30 μ m TLD sekitar 16% dan 54%	[2]
<i>Radiochromic film</i> (Gafchromic EBT3) dengan radionuklida Y-90 dan Lu-177	Disimulasikan dalam Monte Carlo untuk menentukan pengendapan energi oleh peluruhan beta radionuklida.	Y-90 dalam polietilen densitas rendah, tulang kortikal, dan paru-paru adalah 95,5%, 90,9%, dan 94,0%. Lu-177 di paru-paru adalah 93,6%.	[15]
OSLD dengan radionuklida Iodium-131	SPECT/CT	Setelah injeksi, radiofarmasi ini cepat dieliminasi dari darah, terutama melalui ginjal, dengan waktu paruh eliminasi sekitar 2,5 jam, sementara distribusinya menunjukkan dosis tertinggi pada ginjal (1,63 mGy/MBq) tetapi tetap dalam batas toleransi toksisitas. Akumulasi radionuklida yang signifikan ditemukan di lesi kanker HER2-positif, terutama pada pasien dengan metastasis besar,	[11]

		mendukung potensinya sebagai terapi.	
TLD dengan radionuklida Iridium-192	Pengukuran Dosis Radiasi	Hasil penelitian menunjukkan rata-rata perbedaan relatif untuk dosis yang diukur di bagian depan phantom adalah sekitar 10%, sedangkan di bagian belakang dan samping phantom mencapai sekitar 16%. Selain itu, terdapat sekitar 4% <i>under-estimation</i> dalam keseluruhan data, yang menunjukkan bahwa perhitungan dosis dari simulasi cukup sesuai dengan hasil pengukuran.	[3]
Radalert 100x™ survey meter dengan radionuklida Tc-99m MIBI, Tc-99m MDP	Pengukuran Dosis Radiasi, Pengukuran Dosis Efektif	Hasil menunjukkan bahwa dosis efektif rata-rata untuk pemindaian jantung (GP1) adalah 401,2 µSv di posisi A dan 432,5 µSv di posisi B, sedangkan untuk pemindaian tulang (GP2) adalah 950,3 µSv di posisi A dan 905 µSv di posisi B, dengan perbedaan signifikan ($P < 0,000$). Terdapat korelasi positif antara pengukuran dosis dengan Radalert 100x dan Aloka dosimeter ($r = 0,91$ untuk GP1, $r = 0,95$ untuk GP2).	[12]
TLD dengan radionuklida Iodin-131 (I-131), Technetium-99m (Tc-99m)	Kalibrasi Dosimeter	Dosis operasional untuk staf medis nuklir menunjukkan bahwa dosis setara Hp (10), Hp (0,07), dan Hp (3) diukur untuk staf yang bekerja dengan I-131 dan Tc-99m. Rata-rata Hp (10) untuk staf yang menangani I-131 adalah 134 µSv, sedangkan untuk Tc-99m, rata-rata	[15]

bervariasi antara 17 hingga 871 μSv , dengan rata-rata 247 μSv . Dosis Hp (0,07) berkisar dari 276 hingga 9642 μSv , dan Hp (3) dari 90 hingga 486 μSv . Hasil pengukuran menunjukkan konsistensi yang baik antara dosimeter TLD-100 dan GR-200, meskipun ada perbedaan sensitivitas.

Thermoluminescent Dosimeters (TLD) dengan radionuklida Technetium-99m (Tc-99m), Fluor-18 (F-18)

Pengukuran Dosis Radiasi

Hasil ini menunjukkan penurunan signifikan dosis radiasi tahunan pekerja kedokteran nuklir, dari 1,79 mSv (1992–1999) menjadi 0,46 mSv (2012–2017), dengan semua dosis tetap di bawah batas aman. Instalasi PET/CT tidak meningkatkan paparan, berkat langkah perlindungan radiasi yang mengurangi paparan hingga 85%. Risiko kanker tiroid 5,7 kali lebih tinggi pada pekerja wanita dibandingkan pria, dengan risiko rata-rata sangat kecil dibandingkan risiko kanker spontan.

[9]

Berdasarkan penelitian oleh Phornpailin, et al. [13], Parvaresh, et al. [7] dan Wisetnan, et al. [14] membandingkan dosimeter dalam konteks berbeda dengan perbandingan berdasarkan jenis radionuklida, pada penelitian Penelitian oleh Phornpailin, et al. [13] menggunakan dosimeter OSL nanoDot untuk mengukur dosis radiasi dari F-18 di fasilitas PET/CT, menemukan bahwa dosis tertinggi mencapai 21,72 mSv/tahun di area terkontrol, sementara area terawasi tetap dalam batas aman. Pada penelitian Parvaresh, et al. [7] menggunakan dosimeter *ionization chamber* untuk mengukur efisiensi pelindung terhadap Tc-99m dan I-131, menunjukkan efisiensi hingga 99,5% bergantung pada jenis pelindung, dengan pelindung timbal 11 – 28 mm memberikan efisiensi optimal 90,6% – 99% untuk I-131. Pada penelitian oleh Wisetnan, et al. [14] menggunakan dosimeter OSL untuk mengevaluasi paparan radiasi dari pasien kanker tiroid yang dirawat dengan I-131, menemukan beberapa area dengan dosis melebihi batas aman, sehingga disarankan penggunaan pelindung tambahan. Kesimpulannya, inovasi dosimetri penting untuk meminimalkan risiko paparan radiasi sekaligus memastikan keselamatan pasien dan pekerja di lingkungan kedokteran nuklir.

Berdasarkan keempat penelitian pada tabel menggunakan dosimeter berbasis OSLD dan TLD, namun dengan fokus dan hasil yang berbeda. Pada penelitian oleh Hoang, et al. [5]

mengevaluasi dosis pada pekerja kedokteran nuklir dan menemukan dosis radiasi di bawah batas aman ICRP, meskipun ada variasi antar individu, menekankan pentingnya evaluasi lingkungan kerja. Pada penelitian Noriaki, et al.[6] membandingkan akurasi berbagai dosimeter, menunjukkan bahwa DOSIRIS dan VISION lebih unggul dalam mengukur dosis Hp(3) pada lensa mata dibandingkan NanoDot, yang sering melebihi-lebihkan dosis, relevan untuk pencegahan katarak. Penelitian Ghada, et al.[3] memfokuskan pada dosis ekstremitas menggunakan radionuklida dengan hasil menunjukkan dosis tahunan tetap di bawah batas aman 500 mSv, meskipun terdapat variasi signifikan antar grup pekerja. Sementara itu pada penelitian Jean, et al.[10] mengevaluasi optimasi dosimetri dalam terapi radionuklida, menemukan tingkat optimasi yang bervariasi dari rendah (Ra-223) hingga sangat tinggi (Y-90 microspheres), mencerminkan kebutuhan peningkatan konsistensi dalam penerapan dosimetri untuk efisiensi dan keamanan terapi. Keseluruhan penelitian ini menyoroti pentingnya pengukuran dosis yang akurat dan optimalisasi dosimetri untuk meningkatkan keamanan dan efektivitas dalam kedokteran nuklir.

Berdasarkan kedua penelitian pada tabel yang menggunakan dosimeter berbeda. Pada penelitian oleh Ashok, et al.[4] mengevaluasi distribusi dosis beta dari Y-90 dan Lu-177 menggunakan simulasi Monte Carlo yang divalidasi secara eksperimental, menghasilkan kesesuaian tinggi antara simulasi dan pengukuran eksperimental, yang memperkuat keandalannya dalam berbagai jenis jaringan. Sementara itu, penelitian oleh Maamoun, et al.[12] memfokuskan pada pengukuran paparan radiasi yang diterima pasien di ruang tunggu selama pemindaian jantung dan tulang. Dosis rata-rata untuk pemindaian jantung berkisar antara 401,2–432,5 μ Sv, sedangkan pemindaian tulang mencapai 905–950,3 μ Sv. Dengan sensitivitas tinggi EBT3 pada dosis rendah hingga menengah dan tingkat error yang dapat diterima, penelitian ini memperkuat peran EBT3 dalam berbagai aplikasi dosimetri di kedokteran nuklir. Kedua penelitian menyoroti pentingnya keakuratan pengukuran dosis, baik melalui simulasi validasi eksperimental maupun penggunaan dosimeter sensitif, untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi dalam praktik medis.

Berdasarkan ketiga penelitian pada tabel yang menggunakan dosimeter yang berbeda pada penelitian oleh Choi, et al.[15] menggunakan TLD untuk mengukur dosis radiasi pada phantom, menunjukkan keselarasan dosis yang baik antara pengukuran dan simulasi dengan perbedaan rata-rata 10 – 16%, meskipun ada sekitar 4% under-estimation dibandingkan perhitungan. Dehghan, et al.[8] juga menggunakan TLD dan menemukan konsistensi yang baik antara TLD-100 dan GR-200, meskipun ada perbedaan sensitivitas antar perangkat. Olivier, et al.[2] mengevaluasi TLD berbasis lithium fluoride untuk pengukuran dosis Hp(0,07) pada radiologi nuklir, menyoroti kepekaan tinggi terhadap dosis kulit, namun dengan variasi respons tergantung pada jenis radionuklida dan perlindungan yang digunakan. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa TLD unggul dalam pengukuran dosis personal, terutama untuk dosis kulit di radiologi nuklir, namun sensitivitasnya dapat dipengaruhi oleh jenis radionuklida. *Ionization chambers* menawarkan stabilitas kalibrasi yang sangat baik dan cocok untuk pengukuran energi luas tetapi kurang sensitif terhadap variasi spektrum kecil. Sementara itu, *X-ray multimeters* (XMMs) sangat sensitif untuk pengukuran dosis mamografi tetapi membutuhkan pengaturan parameter spektrum radiasi yang presisi. Kesimpulannya, pemilihan dosimeter harus didasarkan pada kebutuhan aplikasi, stabilitas kalibrasi, sensitivitas, serta kondisi operasional, untuk memastikan hasil pengukuran yang optimal dan relevan.

Berdasarkan ketiga penelitian pada tabel yang menggunakan dosimeter yang berbeda penggunaan dosimeter dalam berbagai konteks pengukuran radiasi, tetapi masing-masing memiliki pendekatan dan fokus berbeda. Pada penelitian Farah, et al.[1] menggunakan *dose calibrator Capintec CRC 25R* untuk mengevaluasi kestabilan dan presisi aktivitas radionuklida Tc-99m dan Co-57 di lingkungan medis, menghasilkan nilai presisi yang sangat tinggi (0,305% – 0,307%) dan kestabilan (0,437% – 0,563%), menunjukkan keandalannya dalam aplikasi klinis

rutin. Penelitian oleh Krisch, et al.[11] memfokuskan pada pengembangan teknik MRT dan SSRT dengan sinar-X sinkrotron, yang memerlukan dosimetri mikro untuk distribusi dosis pada volume mikroskopis, relevan untuk aplikasi berteknologi tinggi dengan kebutuhan akurasi spasial tinggi. Pada penelitian Adliene, et al.[9] menggunakan TLD untuk mengukur dosis radiasi, mencatat dosis radiasi tahunan pekerja kedokteran nuklir, dari 1,79 mSv (1992- 1999) menjadi 0,46 mSv (2012- 2017), dengan semua dosis tetap di bawah batas aman. Perbandingan hasil menunjukkan bahwa *dose calibrator* unggul dalam pengukuran aktivitas radionuklida dengan presisi tinggi untuk kestabilan rutin, sedangkan dosimetri mikro dalam teknik MRT dan SSRT mendukung aplikasi yang memerlukan distribusi dosis presisi pada skala mikroskopis. Sementara TLD menunjukkan keandalannya dalam pengukuran dosis personal, terutama untuk aplikasi medis seperti CT, meskipun memiliki keterbatasan dalam akurasi spasial untuk volume kecil. Pemilihan jenis dosimeter harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik seperti presisi, cakupan spasial, dan sensitivitas terhadap lingkungan.

Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya sebaiknya berfokus pada pengembangan dan optimalisasi dosimeter untuk aplikasi yang lebih spesifik dalam kedokteran nuklir, seperti meningkatkan akurasi deteksi radionuklida tertentu (Tc-99m, I-131, F-18, atau Lu-177), melakukan penelitian perbandingan performa berbagai jenis dosimeter dalam kondisi klinis, atau mengembangkan sistem dosimeter untuk pengukuran *real-time* dosis radiasi pada pasien selama prosedur diagnostik dan terapi. Selain itu, fokus dapat diarahkan pada evaluasi paparan radiasi yang diterima oleh staf medis, pengembangan dosimeter untuk terapi radionuklida yang mampu mengukur dosis internal secara lebih akurat, serta penerapan teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk analisis data dosimeter demi meningkatkan efisiensi dan keamanan penggunaan. Penelitian juga dapat mengeksplorasi perlindungan pasien anak melalui dosimeter sensitif dan protokol yang aman, atau mengukur dampak biologis paparan radiasi pada tingkat seluler untuk memahami risiko lebih mendalam. Sehingga fokus ini mendukung kemajuan teknologi dan keselamatan dalam kedokteran nuklir.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan pentingnya peran dosimeter dalam mendukung aplikasi kedokteran nuklir. Berbagai jenis dosimeter, seperti *dose calibrator*, TLD, OSLD, dan Gafchromic EBT3, memiliki karakteristik unik yang dapat disesuaikan dengan jenis radionuklida, energi radiasi, dan kebutuhan spesifik klinis. Evaluasi yang dilakukan menunjukkan bahwa pemilihan dosimeter yang tepat sangat penting untuk meningkatkan akurasi pengukuran dan memastikan keselamatan radiasi bagi pasien dan tenaga medis. Selain itu, Pengembangan teknologi seperti integrasi sistem digital dan pengukuran dosis *real-time* membuka peluang untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi, menjadikan penelitian ini penting dalam optimalisasi penggunaan dosimeter di kedokteran nuklir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan selama penulisan dan review jurnal ini. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Ibu Erlinda Ratnasari Putri, S.Si, M.Si. yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berguna. Dukungan dan bantuan dari dosen-dosen sangat membantu dalam menyelesaikan artikel ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. M. Mutmainna et al., „Pengujian Karakteristik Alat Ukur Radiasi Dose Calibrator menggunakan Sumber Teknesium-99m dan Cobalt-57 (Sumber Standar) di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUD A. W. Sjahrane Samarinda,“ *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah*

- Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, vol. 20, pp. 138-145, Jun 2023, doi: 10.20527/15439.
- [2] H. V. Olivier et al., „Evaluation of different types of lithium fluoride thermoluminescent detectors for ring dosimetry in nuclear medicine,” *Journal of Radiation Measurements*, vol. 159, pp. 1-11, Dec. 2022, doi: [10.1016/j.radmeas.2022.106866](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2022.106866).
- [3] G. A. Khouqeer, „Assessment of extremity occupational exposure at a nuclear medicine department,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 15, pp. 257-261, March 2022, doi: [10.1016/j.jrras.2022.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.03.004).
- [4] T. Ashok et al., „Absorbed dose distributions from beta-decaying radionuclides: Experimental validation of Monte Carlo tools for radiopharmaceutical dosimetry,” *Journal Of Medical Physics Research and Practice*, vol. 47, pp. 1-12, Nov. 2020, doi: [10.1002/mp.14463](https://doi.org/10.1002/mp.14463).
- [5] T. P. Hoang et al., "Assessment of radiation exposure in a nuclear medicine department of an oncology hospital," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 16, pp. 1687-8507, Feb 2023, doi: [10.1016/j.jrras.2023.100564](https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100564).
- [6] M. Noriaki et al., "Determination of a reliable assessment for occupational eye lens dose in nuclear medicine," *Journal Of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 23, pp. 1-10, June 2022, doi: [10.1002/acm2.13713](https://doi.org/10.1002/acm2.13713).
- [7] R. Parvaresh et al., "Evaluations for Determination of Optimum Shields in Nuclear Medicine," *Journal Biomed Physics Eng*, vol. 10, pp. 651-658, March 2020.
- [8] N. Dehghan, dan S. Sina, "Measurement Of Operational Dosimetry Quantities For Nuclear Medicine Staff," *Journal Radiation Protection Dosimetry*, vol. 190, pp. 1-6, Aug 2020, doi:[10.1093/rpd/ncaa083](https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa083).
- [9] D. Adliene, B. Grieciene, K. Skovorodko, J. Laurikaitiene, J. Puiso, "Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers," *Journal Pre-proof*, vol. 10, pp. 35-38, January 2020.
- [10] J. Urbain et al., "Theranostic Radiopharmaceuticals: A Universal Challenging Educational Paradigm in Nuclear Medicine," *Journal Of Nuclear Medicine*, vol. 64, pp. 986-991, Jun 2023, doi: [10.2967/jnumed.123.265603](https://doi.org/10.2967/jnumed.123.265603).
- [11] W. Elshami et al., "Occupational radiation dose assessment for nuclear medicine workers in Turkey: A comprehensive investigation," *Journal of King Saud University - Science* vol. 31, pp. 1-16, March 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102005>
- [12] I. Maamoun, dan Sh. Alramlawy, "Patient's Radiation Dose in the Waiting Area During Nuclear Cardiac Perfusion and Bone Scans in Nuclear Medicine Departments," *Egyptian Journal Nuclear Medicine*, vol. 23, pp. 44-57, Dec 2021.
- [13] P. Pairodsantikul et al., "Assessment of Area Radiation Dose for the National Cyclotron and PET Centre at Chulabhorn Hospital in Thailand," *Journal Of Nuclear Medicine Technology*, vol. 52, pp. 152-157, Jun 2024.
- [14] C. Wisetnan et al., "A survey of radiation released from patients treated with radioiodine-131 therapy," *Journal of Associated Medical Sciences*, vol. 54, pp. 17-21, Mar. 2021.
- [15] Y. Choi et al., "Reference dosimetry for inter-laboratory comparison on retrospective dosimetry techniques in realistic field irradiation experiment using ^{192}Ir ," *Journal Nuclear Engineering and Technology*, pp. 2599-2605, Jan 2022, doi: [10.1016/j.net.2022.01.007](https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.007).