



Audit Dosimetri pada Teknik IMRT/VMAT Terapi Radiasi pada *Linear Accelerator* (LINAC)

Syalima Salima^{1*}, Nazwa Adhelia Shabira¹, Erlinda Ratnasari Putri¹

¹Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman
Jl. Barong Tongkok No 4, Gunung Kelua, Kecamatan Samarinda Ulu, Samarinda 75242, Kalimantan Timur, Indonesia

*E-mail korespondensi: syalimasalimah@gmail.com

Article Info:

Received: 09-12-2024

Revised: 19-12-2024

Accepted: 20-12-2024

Keywords:

Audit, Dosimetric, IMRT, VMAT



Abstract

Dosimetric audit is crucial in ensuring and improving the quality of radiation therapy, particularly in the field of radiotherapy using techniques such as Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) and Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT). This study employs a literature review methodology, analyzing and comparing 15 articles based on dosimeters and modalities. The results indicate that various dosimetric audit methods, including the use of glass dosimeters, gafchromic films, ion chambers, and EPID, provide accurate results in measuring doses for IMRT and VMAT techniques using Linac. Most studies show good success rates, with dose differences between the dosimeter and the planned dose within the tolerance limits of $\pm 5\%$. However, some studies also report significant dose variations, especially in organs at risk (OAR) and areas with steep dose gradients. This study highlights that routine dosimetric audits and the use of appropriate detection technologies are essential to improving the precision and safety of radiation therapy for patients.

PENDAHULUAN

Audit dosimetri berperan penting dalam memastikan dan meningkatkan kualitas terapi radiasi dengan membantu pusat-pusat di seluruh dunia dengan memberikan dosis yang akurat [1]. Seperti Badan Energi Atom Internasional (IAEA) dan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memiliki sejarah panjang dalam menyediakan audit dosimetri dalam radioterapi di seluruh dunia. Program audit dosis pos bersama IAEA/WHO untuk memeriksa dosimetri referensi berkas foton energi tinggi di pusat radioterapi yang telah beroperasi selama lebih dari 5 dekade. Pada beberapa tahun terakhir, IAEA telah mendukung pengembangan metodologi untuk audit dosimetri [2]. Audit dosimetri merupakan alat untuk peningkatan kualitas dan didefinisikan sebagai analisis sistematis dan kritis terhadap kualitas kegiatan dosimetri yang dilakukan di pusat radioterapi tertentu [3].

Saat ini, sebagian besar pengobatan radioterapi diberikan menggunakan akselerator linier elektron medis (Linac). Linac ini dilengkapi untuk melakukan perawatan radioterapi modern seperti *Intensity-Modulated Radiation Therapy* (IMRT) dan *Volumetric Modulated Arch Therapy* (VMAT) memungkinkan untuk memberikan dosis radiasi yang sesuai, sehingga meningkatkan efektifitas pengobatan dengan meminimalkan risiko pada jaringan sehat disekitar [3].

IMRT sendiri merupakan teknik radioterapi dengan modulasi intensitas sinar radiasi. IMRT adalah teknik kompleks dalam radioterapi yang menggunakan program komputer untuk mengatur mesin Linac. Teknik ini menggunakan berkas radiasi yang presisi ke target berbentuk 3 dimensi yang dicapai dengan cara mengatur intensitas berkas radiasi dan lapangan radiasi

dengan mengatur bukaan *multileaf collimator* (MLC). Teknik radioterapi IMRT memberikan radiasi dengan *static gantry* atau posisi *gantry* diam selama radiasi diberikan dan laju dosis yang diberikan konstan. Sedangkan VMAT adalah teknik radiasi dengan gantri bergerak terus menerus/kontinu di sekitar pasien, sementara radiasi tetap aktif atau dalam posisi *beam on*. VMAT memberikan dosis radiasi dengan *rotating gantry* atau gantry yang berputar kontinu mengelilingi pasien selama radiasi diberikan dan laju dosis yang berubah terhadap waktu [4].

Berdasarkan kedua teknik di atas, beberapa dosimeter yang digunakan seperti Film *Gafchromic*, Film *Radiochromic*, *Ion Chamber*, *Thermoluminescent Dosimeter* (TLDs), *Optically Stimulated Luminescent* (OSL), dan *Electronic Portal Imaging Device* (EPID). Penggunaan dosimeter ini mendukung verifikasi dosis dan memastikan akurasi distribusi radiasi sesuai dengan kebutuhan kedua teknik tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mereview hasil-hasil penelitian sebelumnya tentang penggunaan audit dosimetri pada teknik IMRT dan VMAT dalam terapi radiasi pada Linac, sehingga diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pentingnya audit dosimetri dalam memastikan akurasi dosis radiasi yang diterima pasien di bidang radioterapi.

Film *Gafchromic*

Film *Gafchromic* merupakan perangkat dosimetri yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi pengion yang diserap untuk foton berenergi tinggi. Pada dosimeter ini sesuai untuk teknik penyinaran IMRT/VMAT karna dengan rentang dinamis yang dirancang untuk kinerja optimal dalam kisaran dosis 0,2 – 20 Gy [1].

Pada beberapa penelitian terdahulu, penggunaan dosimeter film *Gafchromic* pada IMRT/VMAT yaitu dengan menekankan penggunaan audit dosimetri pos untuk memastikan akurasi dosis yang diberikan oleh akselerator linier (Linac). Oleh karena itu, *Film Gafchromic* digunakan untuk memverifikasi dosis keluaran dengan toleransi $\pm 5\%$ [1]. Waheb et al., 2021 [5] fokus pada konsistensi tingkat kelulusan gamma diantara berbagai alat dosimetri. Film *Gafchromic* EBT3 dibandingkan dengan alat lain, menunjukkan kendalannya dalam jaminan kualitas IMRT. Kazantsev et al., 2020[1] menggunakan pendekatan internasional untuk audit IMRT dan VMAT. Film *Gafchromic* digunakan untuk verifikasi independen, dengan hasil yang menunjukkan kesesuaian yang baik dengan perhitungan sistem perencanaan dosis (TPS). Nakamura et al., 2023[6] mengembangkan sistem audit virtual yang efisien untuk kredensial dosimetri IMRT. Film menunjukkan tingkat kelulusan gamma yang sangat tinggi (99,4%), menyoroti efisiensi audit virtual dibandingkan dengan metode tradisional. Roy et al., 2023[7] membandingkan hasil antara IMRT dan *RapidArc* (RA) menggunakan film *Gafchromic* dan EPID. Menunjukkan bahwa RA memiliki tingkat kelulusan gamma yang lebih baik, memberikan wawasan tentang keunggulan teknik tertentu dalam perawatan.

***Optically Stimulated Luminescence* (OSL)**

Optically Stimulated Luminescence (OSL) merupakan teknik pengukuran dosis radiasi yang memanfaatkan induksi optis untuk melepaskan elektron yang terperangkap dalam bahan dosimeter. OSL digunakan sebagai dosimeter berbasis $Al_2O_3:C$ dalam memeriksa dosis pada *Intensity-Modulated Radiation Therapy* (IMRT) dan *Volumetric Modulated ArchTherapy* (VMAT). Dosimeter OSL mengukur variasi dosis dengan tingkat presisi yang dapat diterima $\pm 5\%$ [2].

***Electronic Portal Imaging Device* (EPID)**

Electronic Portal Imaging Device (EPID) memiliki peran penting dalam *Intensity-Modulated Radiation Therapy* (IMRT) dan *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT) dengan menyediakan verifikasi dosis yang akurat dan pemantauan posisi pasien secara *real-time*. Dalam IMRT dan VMAT, EPID digunakan untuk membandingkan dosis aktual yang diterima pasien dengan dosis yang direncanakan dalam rencana pengobatan, memastikan bahwa pengobatan dilakukan dengan tepat. Selain itu, EPID memungkinkan teknisi untuk memantau posisi pasien selama pengobatan, sehingga jika ada deviasi dari posisi yang diinginkan, penyesuaian dapat dilakukan

secara langsung untuk mengoptimalkan pengiriman dosis. Dengan kemampuan untuk mendeteksi kesalahan dan memberikan tanggapan yang cepat, EPID meningkatkan keselamatan pasien dengan mengurangi risiko *overdosis* atau *underdosis* [8].

Ion Chamber

Ion chamber adalah dosimeter yang digunakan untuk menentukan dosis radiasi yang diserap dalam terapi radiasi. Pada IMRT (*Intensity-Modulated Radiation Therapy*) dan VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*) *ion chamber* bekerja dengan cara mengukur arus listrik yang dihasilkan oleh ionisasi gas di dalam chamber ketika terkena radiasi [5].

Menurut beberapa penelitian terdahulu, Ghazal et al., 2022 [9] menyatakan bahwa *ion chamber* memberikan hasil yang lebih konsisten dalam pengukuran dosis dibandingkan dengan film *gafchromic*, karena *ion chamber* dianggap lebih akurat untuk aplikasi klinis karena respons yang stabil terhadap dosis. Waheeb et al., 2021 [5] menggunakan *ion chamber* sebagai alat utama untuk verifikasi dosis dalam audit dan hasilnya menunjukkan bahwa *ion chamber* dapat mendeteksi kesalahan dalam dosis yang diberikan, sehingga penting untuk memastikan kesesuaian dengan standar internasional. Kazantsev et al., 2020 [1] menunjukkan bahwa *ion chamber* dapat digunakan untuk pengukuran dosis yang tepat dalam kondisi klinis, dengan toleransi kesalahan yang ketat. Jurnal ini juga menekankan pentingnya kalibrasi yang tepat untuk memastikan akurasi pengukuran. Masood et al., 2020 [10] menggambarkan penggunaan *ion chamber* dalam audit untuk memastikan kesesuaian *output* dari linac, dan jurnal ini menekankan bahwa audit dosimetri dengan *ion chamber* dapat membantu mencegah kesalahan dalam pengobatan radiasi. Menekankan bahwa kalibrasi yang tepat untuk *ion chamber* sangat penting dalam konteks IMRT/VMAT. Jurnal ini menunjukkan bahwa ketidakakuratan dalam kalibrasi dapat menyebabkan kesalahan signifikan dalam pengukuran dosis.

Thermoluminescent Dosimeter (TLDs)

Thermoluminescent Dosimeters (TLDs) adalah alat yang mengukur dosis radiasi berdasarkan cahaya yang dilepaskan oleh material tertentu setelah dipanaskan dan digunakan dalam audit dosimetri IMRT untuk memastikan akurasi dosis radiasi yang diberikan selama terapi radiasi. Pada penelitian Glenn et al., 2022 [17] penggunaan *Thermoluminescent Dosimeters* (TLDs) ditempatkan dalam phantom antropomorfik dari program *Quality Assurance* (QA) IROC Houston untuk mengevaluasi dosis yang dihitung oleh sistem perencanaan terapi (TPS) sesuai dengan dosis yang sebenarnya diterapkan.

Film Radiochromic

Film *Radiochromic* adalah jenis film yang digunakan dalam pengukuran dosimetri dalam radioterapi. Film ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap radiasi, yang memungkinkan untuk merekam distribusi dosis secara akurat. Ketika terkena radiasi, bahan dalam film ini mengalami perubahan warna (sering kali menjadi lebih gelap), yang proporsional dengan dosis radiasi yang diterima. Penggunaan film *radiochromic* memungkinkan evaluasi akurasi dosis yang dihitung oleh sistem perencanaan perawatan (TPS) dengan dosis yang sebenarnya diberikan oleh mesin terapi. Hal ini penting untuk memastikan pasien menerima dosis yang sesuai dan sesuai dengan protokol [17].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian studi literatur (*literature review*) sebanyak 15 artikel untuk mengidentifikasi penelitian yang relevan mengenai Audit Dosimetri pada Teknik IMRT dan VMAT Terapi Radiasi pada LINAC. Studi literatur dilakukan pada awal Oktober hingga akhir November 2024. Studi yang dipilih adalah publikasi dengan rentang waktu antara tahun 2020 hingga 2024 yang selanjutnya akan dianalisis dan disajikan dalam bentuk Tabel.1. Kemudian akan dibandingkan berdasarkan dosimeter, modalitas, dan hasil penelitian untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mencakup 15 artikel terpilih yang diperoleh melalui proses studi literatur. Tabel berikut menyajikan ringkasan dari artikel-artikel tersebut, yang mencakup penelitian, dosimeter, teknik dan hasil penelitian pada artikel.

Tabel 1. Topik Penelitian

Penelitian	Dosimeter	Teknik	Hasil
Dogan et al., 2023 [19]	<i>Electronic Portal Imaging Device</i> (EPID)	IMRT/VMAT	EPID memberikan hasil yang sensitif dan spesifik dalam mendeteksi kesalahan terkait pasien dan mesin dengan tingkat keberhasilan gamma 85 – 93% pada toleransi sebesar 3%/3mm.
Zamo et al., 2023 [22]	<i>Ion Chamber</i>	VMAT	Hasil evaluasi menunjukkan deviasi dosis rata-rata di bawah 3% antara data yang diukur dan dihitung.
Waheeb et al., 2021 [5]	Film <i>Gafchromic</i> , <i>Ionization Chamber</i> , dan EPID	IMRT/VMAT	Hasil penelitian menghasilkan audit dosimetri IMRT, detektor EPID lebih unggul dibandingkan metode konvensional seperti film <i>Gafchromic</i> dan <i>ionization chamber</i> . EPID mencatat <i>gamma passing rate</i> rata-rata $95,3\% \pm 2,9$ (threshold 5%), $95,28\% \pm 2,7$ (threshold 10%), dan $95,01\% \pm 3,2$ (threshold 15%). Sebagai perbandingan, <i>ionization chamber</i> mencatat $87,4\% \pm 3,0$, $93,5\% \pm 2,8$, dan $94,2\% \pm 2,7$, sementara film <i>Gafchromic</i> mencatat $86,3\% \pm 3,3$, $91,3\% \pm 3,2$, dan $93,3\% \pm 3,2$.
Kazantsev et al., 2020 [1]	<i>Ion Chamber</i> dan Film <i>Gafchromic</i>	IMRT/VMAT	Hasil audit menunjukkan bahwa 79% dari 42 rencana perawatan memiliki skor kualitas di atas 90. Rata-rata rasio dosis yang diukur dengan <i>ion chamber</i> (IC) terhadap dosis TPS adalah 0.988 ± 0.016 untuk PTV dan 1.020 ± 0.029 untuk OAR. Tingkat kelulusan gamma untuk pengukuran film mencapai 94.1% dengan kriteria yang ditetapkan.
Kumar et al., 2022 [8]	<i>Optically Stimulated Luminescence</i> (OSL) dan film <i>Gafchromic</i>	IMRT/VMAT	Variasi persentase dosis yang diukur oleh dosimeter cakram OSL dan film <i>Gafchromic</i> untuk radioterapi konvensional berada dalam rentang 0,15%–4,6% dan 0,40%–5,45%, sementara untuk radioterapi konformal berada dalam kisaran 0,1%–4,9% dan 0,3%–5,0%.
Greer et al., 2024 [2]	<i>Electronic Portal Imaging Device</i> (EPID)	IMRT/VMAT	Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk IMRT ($n = 34$), tingkat kelulusan rata-rata adalah $97,9 \pm 4,5\%$, dengan 31 dari 34 audit lulus optimal. Untuk VMAT ($n = 36$), tingkat kelulusan rata-

			<p>rata adalah $98,5 \pm 2,3\%$, dengan 32 audit lulus optimal. Berdasarkan jenis EPID, hasil untuk IMRT adalah $98,7 \pm 3,7\%$ (Varian aS1000), $99,4 \pm 0,8\%$ (Varian aS1200), dan $94,7 \pm 6,5\%$ (Elekta iView). Untuk VMAT, hasil EPID masing-masing adalah $97,4 \pm 2,9\%$, $99,6 \pm 0,7\%$, dan $99,8 \pm 0,1\%$.</p>
Nakamura et al., 2023 [6]	Film	IMRT	<p>Rata-rata standar deviasi dari tingkat kelulusan gamma masing-masing adalah $99,4 \pm 1,5\%$ dan $99,2 \pm 1,0\%$ dalam evaluasi film.</p>
Glenn et al., 2022 [17]	<i>Termoluminescent Dosimeters (TLDs) dan Film Radiochromic</i>	IMRT	<p>Hasil penelitian menunjukkan pengukuran TLD, pada nilai DLG tinggi (persentil ke-91) menghasilkan overestimasi 1,2% hingga 2,8%, sementara DLG rendah (persentil ke-1) menyebabkan underestimasi $-1,5\%$ hingga $-3,6\%$. Pengukuran film radiochromic memperkuat temuan ini, di mana overestimasi mencapai sekitar 7% untuk nilai DLG yang tinggi, sementara underestimasi dosis rata-rata sebesar 5% terjadi pada nilai DLG yang rendah.</p>
Mrcela et al., 2022 [13]	<i>Ion Chamber</i>	IMRT	<p>Tingkat lolos gamma (<i>gamma passing rate</i>) lebih dari 95% dengan kriteria universal $3\%/2\text{ mm}$.</p>
Duan et al., 2023 [16]	<i>Electronic Portal Imaging Device (EPID)</i>	IMRT	<p>Kinerja dosimeter portal dinilai sangat baik dengan tingkat <i>gamma passing rate</i> (GPR) di atas 99% untuk sebagian besar kasus, tergantung pada jenis Linac dan lokasi kanker.</p>
Razinskas et al., 2023 [12]	<i>Electronic Portal Imaging Device (EPID)</i>	IMRT/VMAT	<p>Pengukuran menggunakan <i>Electronic Portal Imaging Device (EPID)</i> pada <i>Halcyon</i> linac menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara prediksi <i>fluence</i> dan dosis yang diukur. Hasil <i>gamma passing rate</i> rata-rata adalah 99,90% untuk $\gamma 2\%/2\text{ mm}$, 96,64% untuk $\gamma 2\%/1\text{ mm}$, dan 91,87% untuk $\gamma 1\%/1\text{ mm}$ dengan standar deviasi masing-masing sebesar 0,15%, 1,67%, dan 2,56%. Analisis ini menggunakan ambang batas dosis rendah 10</p>
Roy et al., 2023 [7]	<i>Electronic Portal Imaging Device (EPID)</i>	IMRT	<p>EPID pada beberapa pengaturan menunjukkan hasil <i>gamma passing rate</i> yang sangat baik, dengan rata-rata 99,6% untuk kriteria 3% DD dan 3 mm DTA pada teknik <i>RapidArc (RA)</i> dan 98,6% pada teknik IMRT. Untuk kriteria yang lebih ketat, seperti 1% DD</p>

Mobit et al., 2021 [21]	Termoluminescent dosimeters (TLDs) dan Film <i>Gafchromic</i>	IMRT	dan 1 mm DTA, RA mencatat 54,7% sementara IMRT mencatat 39,3%. <i>Output</i> Linac memenuhi batas $\pm 3\%$, dengan tingkat kelulusan gamma $\geq 91\%$.
Yeap et al., 2020 [11]	Electronic Portal Imaging Device (EPID)	IMRT/VMAT	Penelitian ini menunjukkan bahwa EPID memiliki akurasi tinggi untuk QA spesifik pasien pada IMRT/VMAT, dengan sinyal yang linear terhadap dosis ($R^2 \geq 0,95$) dan rasio seragam rerata $1,07 \pm 0,04\%$. Program generasi fluens berhasil menghasilkan peta fluens dengan analisis gamma rata-rata 95,6% (SD 2,08%), meskipun beberapa perencanaan belum mencapai ambang 95%, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut.
Kafhali et al., 2021 [18]	Electronic Portal Imaging Device (EPID)	VMAT	ArcCHECK menunjukkan tingkat keberhasilan yang lebih tinggi dalam uji gamma index dengan tingkat kelulusan di atas 95%. Sebaliknya, EPID A-Si1000 memiliki tingkat keberhasilan yang lebih rendah, dengan hasil uji gamma index berada di bawah 90%.

Pada hasil penelitian yang disajikan pada Tabel.1 berbagai jenis dosimeter dan teknik radioterapi menunjukkan performa yang bervariasi dalam hal akurasi pengukuran dosis. Pembahasan selanjutnya akan membahas lebih lanjut mengenai perbandingan penggunaan dosimeter yang sering digunakan dari penelitian terdahulu.

Penelitian yang dilakukan oleh Dogan et al., 2023 [19] menunjukkan bahwa *Electronic Portal Imaging Device* (EPID) memberikan hasil yang sensitif dan spesifik dengan tingkat keberhasilan *gamma passing rate* 85 – 93%, menunjukkan kemampuan EPID dalam mendeteksi kesalahan yang terkait dengan pasien dan mesin. Penelitian lainnya oleh Waheeb et al., 2021 [5] EPID menunjukkan tingkat kelulusan rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional seperti film *Gafchromic* dan *ionization chamber*. Hasil yang sama juga ditemukan dalam penelitian Greer et al., 2024 [2] yang menunjukkan bahwa EPID memberikan tingkat kelulusan yang tinggi untuk teknik IMRT dan VMAT, dengan rata-rata *gamma passing rate* 97,9% dan 98,5%, tergantung pada jenis sistem EPID yang digunakan.

Pada dosimeter lain seperti *ion chamber* dan film *Gafchromic* juga menunjukkan hasil yang baik dalam pengukuran dosis radiasi. Misalnya, penelitian oleh Zamo et al., 2023 [22] dan Kazantsev et al., 2020 [1] menunjukkan bahwa penggunaan *ion chamber* memberikan deviasi dosis yang sangat kecil, yaitu di bawah 3%, dalam teknik VMAT. Selain itu, penelitian oleh Kumar et al., 2022 [8] menunjukkan bahwa dosimeter film *Gafchromic* memberikan variasi dosis yang sangat kecil, dengan rentang 0,15%– 4,6% untuk radioterapi konvensional dan 0,1%– 4,9% untuk radioterapi konformal, menunjukkan ketepatannya dalam pengukuran dosis.

Selain itu, *Termoluminescent Dosimeters* (TLDs) juga digunakan dalam penelitian oleh Glenn et al., 2022 [17] dan Mobit et al., 2021 [21]. TLD menunjukkan ketepatan yang baik dalam pengukuran dosis radiasi pada teknik IMRT, meskipun terdapat potensi kesalahan dalam pengukuran dosis pada berbagai level DLG. Glenn et al., 2022 [17] mengungkapkan bahwa pengukuran TLD menghasilkan overestimasi pada nilai DLG tinggi dan underestimasi pada nilai DLG rendah.

Secara keseluruhan, dari pembahasan diatas menunjukkan bahwa *Electronic Portal Imaging Device* (EPID) lebih unggul dalam menjaga akurasi pada pengukuran dosis, sehingga topik terbaru yang dapat diajukan adalah penelitian yang berfokus pada penggunaan dosimeter *Electronic Portal Imaging Device* (EPID) berbasis *machine learning* untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam audit dosimetri IMRT/VMAT yang dilakukan pada LINAC untuk mengatasi keterbatasan analisis dosis dengan memanfaatkan *machine learning* dalam menganalisis data dosis, sehingga memungkinkan deteksi kesalahan yang lebih cepat dan tepat.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa audit dosimetri pada teknik IMRT dan VMAT menggunakan berbagai jenis dosimeter, seperti film *Gafchromic*, *ion chamber*, dan EPID, memberikan wawasan penting terkait akurasi dan efisiensi pengukuran dosis dalam radioterapi. Setiap dosimeter memiliki kelebihan dan keterbatasannya, namun EPID dan film *Gafchromic* terbukti memberikan *gamma passing rate* yang tinggi dalam evaluasi dosis. Penggunaan EPID, khususnya, lebih efisien dibandingkan metode konvensional, sedangkan film *Gafchromic* unggul dalam analisis distribusi dosis spasial. *Ion chamber* dan TLDs, meskipun lebih lama digunakan, tetap menjadi pilihan yang andal dalam kalibrasi dosis, dengan deviasi yang minimal. Penelitian ini juga menunjukkan potensi teknologi baru, seperti dosimeter *Electronic Portal Imaging Device* (EPID) berbasis *machine learning*, untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi audit dosimetri. Oleh karena itu, penerapan audit dosimetri yang tepat menjadi sangat penting dalam menjamin keselamatan pasien dan kualitas terapi radiasi, khususnya dalam pengaturan klinis yang terus berkembang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada peneliti sebelumnya dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Mulawarman. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Erlinda Ratnasari Putri, M.Si dan Ibu Fatimah Kunti Hentihu, M.Si yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan jurnal penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kazantsev et al., "IAEA methodology for on-site end-to-end IMRT/ VMAT audits: an international pilot study," *Acta Oncologica*, vol. 59, no. 2, pp. 141-148, 2020, doi:10.1080/0284186X.2019.1685128.
- [2] P. B. Greer et al., "Experience with remote electronic portal imaging device-based dosimetric auditing for static and rotational intensity modulated radiotherapy," *J. Pre-Proof*, vol. 32, no. 1, pp. 1-4, 2024, doi: 10.1016/j.phro.2024.100674.
- [3] I. Wulandari et al., "Penatalaksanaan Radioterapi Kanker Payudara Teknik IMRT," *J. Radiografer Indonesia*, vol. 6, no. 1, pp. 15-21, 2024, doi:10.55451/jri.v6i1.169.
- [4] D. M. Ghemis et al., "Dosimetric characteristics of 6MV flattening filter free and flattened beams among beam matched linacs: a three-institutional study," *Radiation Oncology*, vol. 18, no. 126, pp. 1-11, 2023, doi:10.1186/s13014-023-02313-5.
- [5] A. H. Waheeb et al., "Comparison between different Dosimetric Tools based on Intensity-modulated Radiotherapy (IMRT): A Phantom Study," *NeuroQuantology*, vol. 19, no. 11, pp. 141-150, 2021, doi:10.14704/nq.2021.19.11.NQ21184.

- [6] M. Nakamura et al., "A virtual audit system for intensity-modulated radiation therapy credentialing in Japan Clinical Oncology Group clinical trials: A pilot study," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 24, no. 6, pp. 1-9, 2023, doi:10.1002/acm2.14040.
- [7] S. Roy et al., "Application of a Comprehensive Treatment Planning Test for Credentialing Intensity-Modulated Radiotherapy and RapidArc in a TrueBeam Linear Accelerator Setup," *J. Medical Physics*, vol. 48, no. 2, pp. 204-209, 2023, doi: 10.4103/jmp.jmp_56_22.
- [8] P. Kumar et al., "Multi-institutional dose audit in radiotherapy facilities using in-house developed optically stimulated luminescence disc dosimeters," *J. Cancer Research and Therapeutics*, vol. 19, no. 1, pp. 361-367, 2022, doi: 10.4103/jcrt.jcrt_753_21.
- [9] M. Ghazal et al., "Dosimetric and mechanical equivalency of Varian TrueBeam linear accelerators," *J. Appl Clin Med Phys*, vol. 22, no. 12, pp. 43-53, 2020, doi: 10.1002/acm2.13058.
- [10] Kh. Masood et al., "Comparison of level-I, -II and -III dosimetry quality audits for MV-photon beams emitted from medical linear accelerators," *International Journal of Radiation Research*, vol. 18, no. 3, pp. 505-510, 2020, doi: 10.18869/acadpub.ijrr.18.3.505.
- [11] C. F. Yeap et al., "Development of a Fluence Generating Programme for Patient Specific Quality Assurance and Calibration of an Amorphous Silicon EPID," *Journal of Physics*, vol. 15, no. 5, pp. 1-7, 2020, doi:10.1088/1742-6596/1505/1/012004.
- [12] G. Razinskas et al., "Sensitivity and Specificity of Varian Halycon's Portal Dosimetry for Plan-Specific Pre-Treatment QA," *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 1-11, 2023, doi: 10.1002/acm2.14001.
- [13] I. Mrcela et al., "Dosimetric Verification of Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) Treatment Plans for Prostate Cancer Patients," *Acta Clin Croat*, vol. 61, no. 3, pp. 21-27, 2022, doi: 10.20471/acc.2022.61.s3.3.
- [14] K. B. Kim, S. H. Choi., "Postal Dosimetry Audits for the Domestic Medical Linear Accelerator," *Progress in Medical Physics*, vol. 31, no. 2, pp. 20-28, 2020, doi: 10.14316/pmp.2020.31.2.20.
- [15] K. M. Sergieva, "Dosimetry Audit in Modern Radiotherapy," *Merit Research Journal of Medicine and Medical Sciences*, vol. 8, no. 8, pp. 448-455, 2020, doi: 10.5281/zenodo.4009600
- [16] L. Duan et al., "Evaluation of Complexity and Deliverability of IMRT Treatment Plans for Breast Cancer," *Department of Radiation Oncology*, vol. 13, no. 1, pp. 1-11, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48331-x.
- [17] M. C. Glenn et al., "Photon beam modeling variations predict errors in IMRT dosimetry audits," *J. Radiotherapy and Oncology*, vol. 166, no. 15, pp. 8-14, 2022, doi:10.1016/j.radonc.2021.10.021.
- [18] M. E. Kafhali et al., "Clinical Experiment on Quality Control Comparison of Complex Treatment Plans of the VMAT Technique Using a Diode-Based Cylindrical Phantom (ArcCHECK) and an Amorphous Silicon-Based Planar Detector (A-Si1000)," *Elsevier B.V.*, vol. 12, no. 1, pp. 1-11, 2021, doi: 10.1016/j.phmed.2021.100044.

- [19] N. Dogan et al., " Use of Electronic Portal Imaging Devices for Pre-Treatment and in vivo Dosimetry Patient-Specific IMRT and VMAT QA: Report of AAPM Task Group 307," *Med Phys*, vol. 50, no. 8, pp. 865-903, 2023, doi:10.1002/mp.16536.
- [20] N. R. Kakade et al., "Dosimetry audit in advanced radiotherapy using in-house developed anthropomorphic head & neck phantom," *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol. 10, no. 2, pp. 1-11, 2024, doi:10.1088/2057-1976/ad222a.
- [21] P. N. Mobit et al., "End-to-End Test for a Radiotherapy Program Based on the Medical Linear Accelerator Installed in a Resource-Limited Oncology Centre in Sub-Saharan Africa," *Radiation Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 22-29, 2022, doi: 10.11648/j.rst.20220802.1.
- [22] F. C. D Zamo et al., " Patient specific quality assurance of volumetric modulated arc therapy of synchronous bilateral breast cancer," *American Association of Medical Dosimetrists*," vol. 49, no. 3, pp. 177-184, 2023, doi: 10.1016/j.meddos.2023.11.003.