



In Vivo Dosimetry pada Radioterapi Menggunakan Teknik *Modulated Arc Therapy* (VMAT) dan *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT)

Muliyana¹, Rilla Ilma Ningrum^{1*}, Erlinda Ratnasari Putri¹

¹⁾ Program 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: nrillailma@gmail.com

Article Info:

Received: 09-12-2024

Revised: 28-12-2024

Accepted: 05-05-2025

Keywords:

In vivo dosimetry, VMAT, IMRT



Abstract

Radiation therapy is an effective method of treating cancer by using ionising radiation to kill cancer cells or shrink tumours. In planning radiation therapy, it is very important to ensure the radiation dose is targeted, so that the tumour gets the maximum dose while the surrounding healthy tissue remains protected. *In vivo dosimetry* (IVD) measures the radiation dose a patient receives during therapy to ensure accurate delivery. This study reviewed previous studies comparing various dosimeters used in Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) and Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT). The methodology used was a literature review of articles published between 2013 and 2023, focusing on *in vivo dosimetry* in VMAT and IMRT. The articles were sourced from databases such as Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect, Elsevier, and PubMed. The findings show that Electronic Portal Imaging Device (EPID) dosimeters are highly effective in dose verification, with gamma passing rates exceeding 95% under 3%/3mm criteria. VMAT showed better dose conformity, with deviations generally within $\pm 2\%$ to $\pm 5\%$, and superior organ-at-risk protection compared to IMRT. This study supports the use of VMAT to improve safety and accuracy in radiation therapy, and provides a framework for policy improvements in radiotherapy services. Future advancements that combine modern dosimeter technology with artificial intelligence may further improve the quality of care, making therapy more accurate and safe for patients.

PENDAHULUAN

Terapi radiasi atau biasa disebut dengan radioterapi merupakan salah satu metode pengobatan atau tindakan medis yang efektif untuk membunuh sel kanker ataupun pengobatan tumor dengan memanfaatkan radiasi pengion. Agar terapi berhasil secara klinis, perencanaan penyampaian dosis harus dilakukan secara tepat sehingga target tumor menerima dosis maksimal tanpa membahayakan jaringan sehat di sekitarnya [1], [2], [5]. Salah satu pendekatan penting dalam proses ini adalah *in vivo dosimetry* (IVD), yang merupakan proses mengukur dosis radiasi yang diterima pasien kanker secara langsung selama radioterapi. Tujuannya untuk memastikan bahwa dosis yang diberikan sesuai dengan rencana dan seakurat mungkin. Ini juga membantu mendeteksi ketidakpastian yang mungkin terjadi selama pengobatan dan mencegah kesalahan atau paparan radiasi yang tidak diinginkan. Dengan adanya IVD, tenaga medis dapat memastikan kesesuaian antara dosis yang direncanakan dan yang benar-benar diberikan, sekaligus mendeteksi potensi kesalahan dosis akibat perubahan posisi, anatomi pasien, maupun kesalahan teknik lainnya [1], [3].

Terdapat 2 contoh teknik terapi radiasi, yakni terapi radiasi modulasi intensitas (IMRT) dan *volumetric modulated arc therapy* (VMAT). *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT) telah

menjadi semakin umum dalam terapi radiasi. IMRT merupakan metode dalam perencanaan terapi pemberian radiasi dengan berkas sinarnya bervariasi (*non-uniform*), untuk mencapai distribusi dosis yang presisi dan sesuai dengan kebutuhan terapi. Hal ini bertujuan agar distribusi dosis homogen sesuai dengan bentuk PTV atau bentuk target. Sehingga dosis maksimum yang diterima target dan dosis minimum yang diterima oleh organ sehat disekitarnya, sehingga tujuan dari radioterapi dapat dicapai dan kualitas hidup pasien akan lebih baik dan meningkat[2].

Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) juga banyak digunakan dalam bidang radioterapi, karena mampu mengontrol area yang disinari dengan lebih akurat. Teknik ini memungkinkan area target, seperti tumor, menerima radiasi yang tepat sesuai dengan bentuknya, sementara jaringan sehat di sekitar tetap terlindungi dari paparan radiasi berlebih. Teknik VMAT ialah teknik modulasi intensitas yang relatif baru yang disampaikan melalui satu atau lebih rotasi gantri yang menggabungkan Multileaf Collimator (MLC) dinamis dengan berbagai tingkat dosis dan kecepatan gantri. Di sisi lain, VMAT menggunakan busur termodulasi intensitas untuk memberikan dosis radiasi yang lebih konsisten dengan volume target, mengurangi dosis tinggi di luar target tetapi meningkatkan dosis rendah[1].

Menurut Ben Mijneer, dosimeter *in vivo* dibagi menjadi dua jenis: detektor *real-time* dan detektor pasif. Detektor *real-time* memberikan hasil secara langsung selama terapi, sedangkan detektor pasif memerlukan sedikit waktu untuk analisis setelah pengukuran. Kedua jenis detektor ini memerlukan kalibrasi, yang dilakukan dengan membandingkan responnya terhadap kondisi radiasi standar seperti jarak sumber ke permukaan (SSD), ukuran medan, dan energi sinar, untuk memastikan hasil yang akurat[3].

Dosimeter *real-time* adalah alat yang dapat mengukur dosis radiasi secara langsung selama prosedur pengobatan dan juga dapat mengukur tingkat dosis untuk memberikan informasi tambahan. Contoh dosimeter *real-time* meliputi dioda, MOSFET (Transistor Efek Medan Semikonduktor Oksida Logam), detektor kilau plastik (PSD), dan perangkat pencitraan portal elektronik (EPID). Detektor pasif tidak bisa memberikan pengukuran secara langsung atau real time. Untuk membaca hasil dari detektor ini, diperlukan waktu beberapa menit hingga beberapa jam, tergantung jenis dosimeternya. Contoh detektor pasif termasuk dosimeter termoluminesen (TLD), dosimeter luminesen yang dirangsang secara optik (OSLD), dosimeter radiofotoluminesen (RPLD), dan detektor MOSFET implan. Detektor ini mampu mengukur dosis pada titik tertentu, sedangkan film radiografi dan *radiochromic* dapat memberikan informasi distribusi dosis dalam dua dimensi[3].

Berdasarkan jenis dosimeter yang sudah dijelaskan diatas digunakan untuk mengukur dosis radiasi yang diterima oleh suatu objek (pasien). Beberapa contoh dosimeter yang ada seperti film Gafchromic, GafChromic EBT3, *Thermoluminescent Dosimeter* (TLD), *Optically Stimulated Luminescent Dosimeter* (OSLD), dan *Electronic Portal Imaging Device* (EPID). Artikel ini bertujuan untuk mereview hasil-hasil penelitian sebelumnya dengan membandingkan beberapa dosimeter yang telah disebutkan menggunakan Teknik *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT) dan *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT), sehingga diharapkan dapat berguna untuk memberikan kerangka kebijakan bagi pemerintah dalam melakukan pembenahan terhadap kualitas pelayanan khususnya di bidang Radioterapi.

Film Gafchromic

Film Gafchromic adalah alat dosimetri yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi ion yang diserap, khususnya untuk foton berenergi tinggi. Dosimeter ini cocok digunakan dalam teknik penyinaran IMRT dan VMAT karena memiliki rentang dinamis yang optimal pada kisaran dosis 0,2-20 Gy. Menurut beberapa penelitian seperti Al Atawneh dkk.,[15] menggunakan film Gafchromic untuk mengukur dosis radiasi pada pasien kanker kepala dan leher. Menunjukkan bahwa film ini sangat efektif untuk memastikan dosis radiasi yang diberikan oleh mesin radioterapi tepat, bahkan ketika ada logam di gigi yang dapat mengganggu pengukuran. Film Gafchromic membantu memastikan bahwa dosis yang diterima pasien akurat,

dengan tingkat toleransi sekitar $\pm 5\%$ [14]. Rudat dkk.,[17] menggunakan dosimeter film GafChromic untuk mengukur dosis permukaan secara in vivo pada pasien kanker payudara yang menerima berbagai teknik radioterapi. Film GafChromic dipilih karena kemampuannya memberikan pengukuran dosis yang akurat di daerah ketidakseimbangan elektronik, seperti di daerah *build-up*, sehingga digunakan untuk memverifikasi dosis yang diterima pasien dengan toleransi yang diharapkan[16].

Thermoluminescence Dosimeter (TLD)

TLD (*Thermoluminescence Dosimeter*) merupakan jenis dosimeter personal yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi gamma, sinar-X, beta, dan neutron. Dosimeter ini digunakan dalam jangka waktu tertentu, misalnya satu bulan, yang kemudian diproses untuk mengetahui jumlah dosis radiasi yang sudah diterimanya. Menurut beberapa penelitian seperti. Maya dkk.,[4] menggunakan *Thermoluminescent Dosimeter* (TLD) untuk mengukur dosis radiasi yang diterima oleh kulit payudara selama pengobatan kanker. Pengukuran ini dengan dua teknik, yaitu *Field-in-Field* (FIF) dan *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT). Menunjukkan bahwa TLD sangat efektif dalam memberikan pengukuran dosis yang akurat, dengan kesalahan yang mungkin terjadi antara 5% hingga 10%. Dengan menggunakan TLD, mereka dapat memastikan bahwa dosis radiasi yang diterima oleh kulit payudara sesuai dengan yang direncanakan, sehingga membantu menjaga keselamatan dan efektivitas pengobatan bagi pasien kanker payudara[3].

EPID (Electronic Portal Imaging Device)

Dosimeter EPID (*Electronic Portal Imaging Device*) adalah alat yang digunakan untuk memverifikasi dosis radiasi secara real-time dalam terapi radiasi, terutama dalam terapi radiasi tubuh stereotaktik (SBRT). Alat ini membantu mendeteksi kesalahan pengiriman dosis yang mungkin terjadi karena gerakan organ, baik selama sesi pengobatan (*intra-fraction*) maupun antar sesi (*inter-fraction*). Dalam penelitian Moustakis dkk.,[14], EPID digunakan bersama teknik *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT) dan *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT) untuk meningkatkan akurasi dan keselamatan pengobatan. VMAT memungkinkan pemberian dosis radiasi secara terus-menerus selama rotasi gantry, sedangkan IMRT memungkinkan pengaturan dosis yang lebih kompleks dan terarah. Penggunaan EPID pada kedua teknik ini memungkinkan verifikasi dosis yang lebih baik, membantu mendeteksi kesalahan pengiriman dosis yang sebelumnya tidak terdeteksi, serta memastikan bahwa dosis yang tepat diberikan ke tumor sambil meminimalkan dampak pada jaringan sehat di sekitarnya[13].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan berdasarkan studi literatur yang dilakukan selama 2 bulan dari Oktober sampai November. Artikel yang ditinjau fokus pada dosimetri *in vivo* untuk radioterapi dengan teknik VMAT dan IMRT, dan diterbitkan antara tahun 2013 hingga 2023. Sumber literatur berasal dari basis data Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect, Elsevier, dan PubMed, dengan menggunakan kata kunci seperti "*in vivo dosimetry*," "VMAT," dan "IMRT." Pemilihan artikel dilakukan secara manual berdasarkan penilaian terhadap judul, abstrak, dan kesesuaian isi artikel dengan fokus kajian. Artikel yang dipilih adalah artikel ilmiah yang telah melalui proses *peer review* yang mengandung pengukuran dosis radiasi secara langsung menggunakan dosimeter seperti EPID, TLD, OSLD, atau film GafChromic, dan dilakukan pada pasien atau fantom. Artikel yang tidak sesuai dengan topik atau tidak memuat data pengukuran dosis dikeluarkan dari kajian. Dari hasil penyaringan, diperoleh 15 artikel utama yang kemudian artikel-artikel ini akan dianalisis dan dibandingkan untuk mengetahui metode dan hasil pengukuran dosimetri, kemudian disusun dalam bentuk tabel (Tabel 1) untuk menyimpulkan teknik yang paling efektif dalam pengukuran *in vivo dosimetry*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mencakup 15 artikel terpilih yang diperoleh melalui proses studi literatur. Tabel 1 menyajikan ringkasan dari artikel-artikel tersebut, yang mencakup author, tahun, dosimeter, teknik, dan hasil penelitian pada artikel.

Tabel 1. Beberapa Penelitian-Penelitian Terdahulu

Author dan Tahun	Dosimeter	Teknik	Hasil
Maya dkk.,[4]	termoluminesensi (TLD) dan luminesensi terstimulasi optik (OSLD)	FIF dan VMAT	Dosis kulit payudara kontralateral adalah 1,0% di FIF dan 2,5% di VMAT mengenai dosis yang ditentukan. Dosis kulit payudara ipsilateral yang diukur dalam fantom antropomorfik menggunakan dosimeter <i>luminescent</i> untuk teknik VMAT dan FIF adalah setara.
Ahmed dkk.,[5]	EPID	IMRT (<i>Intensity-Modulated Radiation Therapy</i>) dan RapidArc	Analisis gamma menunjukkan bahwa kesesuaian antara dosis terukur dan yang direncanakan adalah $\pm 1\%$, dengan 100% titik data memenuhi kondisi kesesuaian. Untuk rencana prostat IMRT dengan area gamma 0,8 (setara dengan 2,1%) / area gamma $>1,2$ (setara dengan 0,3%) dan perbedaan dosis rata-rata adalah 0,42CU. Sistem dosimetri Delta4 dinilai dengan rencana RapidArc.
Mohsin dkk.,[6]	EPID dengan EPIgrayTM	VMAT dan IMRT	Untuk teknik VMAT, dari 15 pasien, 12 pasien (80%) berada dalam rentang toleransi 10%, dan lebih dari 85% titik pengukuran dosis sesuai dengan toleransi. Untuk teknik IMRT, dari 6 pasien, 4 pasien (66,67%) mencapai toleransi 10%, dan lebih dari 90% titik pengukuran dosis memenuhi toleransi untuk 4 pasien. Hal ini bahwa EPIgrayTM efektif untuk memverifikasi dosimetri <i>in vivo</i> .
Fiagan dkk.,[7]	<i>Electronic Portal Imaging Device</i> (EPID)	<i>Volumetric Modulated Arc Therapy</i> (VMAT)	Menunjukkan bahwa Gamma Passing Rate (%GP) untuk teknik VMAT meningkat dari 83,5% menjadi 96,3% setelah Adaptive Radiotherapy (ART) ($p < 0,01$). Nilai area di bawah kurva ROC adalah 0,96 untuk mesin generasi baru (NGM) dan 0,89 untuk mesin generasi lama (OGM). Penurunan volume target

Bossuyt dkk.,[8]	Electronic Portal Imaging Device (EPID)	Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)	perencanaan (PTV) dan kelenjar parotis mencapai 15-35% pada pasien dengan fraksi gagal sebelum ART, menunjukkan efektivitas VMAT pada pengukuran <i>in vivo</i> dosimetri. QA pra-perawatan pada VMAT membutuhkan 5-10 menit, dengan 88% lolos analisis dan <1% memerlukan revisi rencana. Mesin baru lebih akurat (97%) dibanding mesin lama (77%). Dalam analisis <i>in vivo</i>, 16-18% gagal karena posisi pasien, perubahan anatomi, atau masalah teknis. Perbaikan dilakukan dengan pengulangan pengukuran (54%) atau revisi rencana (4%), untuk mencegah kesalahan dosis >5%.
Radzi dkk.,[9]	EPID dengan EPIgray	IMRT dan VMAT	EPIgray berada dalam toleransi 5% untuk kedua rentang energi. Deviasi rata-rata kurang dari $\pm 2\%$ dan $\pm 7\%$ pada berkas foton 6 MV dan 10 MV. Evaluasi klinis menunjukkan kesesuaian dalam $\pm 3\%$ untuk IMRT pada prostat dan di bawah $\pm 5\%$ untuk VMAT pada energi 6 MV dan 10 MV.
Cho dkk.,[10]	film fleksibel	VMAT	Dosimeter film fleksibel memiliki sensitivitas tinggi pada saluran merah RGB, dengan akurasi dosis lebih tinggi. Ketergantungan orientasi <1%, P_{Vm} 1.000 ± 0.004 (CV 0.38%). ARS dosis-respons 0.9994, sensitivitas menurun. Ketergantungan energi dan laju dosis kecil. ARS kalibrasi 0.9993, ketidakpastian 5.4%. Uji sitotoksitas: viabilitas 85.3%–106%. Ketidakpastian aplikasi pasien 3.7%–4.3%, perbedaan dosis 0.1%–4.2%.
Esposito dkk.,[11]	SoftDiso (SD), Dosimetry Check (DC), dan PerFRACTION (PF) berbasis EPID	VMAT, Terapi Radiasi Tubuh Stereotaktik, Modulasi Intensitas, dan Konformal 3D.	Hasil Penelitian IVD berbasis EPID untuk VMAT menunjukkan OTL%: 8,9% (SoftDiso), 18,0% (DC), 16,0% (PF). Kesalahan anatomi: 9,0% (kepala dan leher), 9% (abdomen). OTL% untuk teknik lain: 3% (SBRT), 7% (VMAT), 10,4% (IMRT), 13,2% (3DCRT). Hasil ini menekankan pentingnya pemilihan sistem untuk akurasi dosis.

Piermattei dkk.,[12]	SOFTDISO dan EPID	VMAT, 3DCRT, dan IMRT	Dari 11.357 pengujian, 7% gambar EPID salah dan tidak disertakan. Pada VMAT (7235 tes), 6% OTL, terutama di toraks (30%) dan payudara (12%). Pada 3DCRT (4122 tes), 21% OTL, tertinggi di panggul (25%) dan perut (24%). Kesalahan OTL dibagi menjadi teknis dan morfologi, dengan koreksi berhasil memperbaiki sebagian besar kasus, meski beberapa pengecualian tetap ada.
Baba & Singh dkk.,[13]	GafChromic EBT3	2-dimensional radiotherapy (2DRT) dan (IMRT)	Perbedaan signifikan terlihat pada 7F-IMRT (Rata-rata = 1,62 Gy, SD = 0,23) dibandingkan dengan 2D RT (Rata-rata = 2,21 Gy, SD = 0,33). Dosis kulit lebih tinggi pada 2DRT sebesar 26,7% dibandingkan pada 7F IMRT.
Moustakis dkk.,[14]	Electronic Portal Imaging Device (EPID)	3DCRT (<i>three-dimensional conformal radiation therapy</i>), IMRT dan VMAT	Tingkat kelulusan untuk 3DCRT, IMRT, dan VMAT dengan 1%/1mm di lapangan terbuka adalah 84,86%, 92,91%, dan 98,75%, dan dengan mempertimbangkan MLC-CIAO+ 1cm (ambang batas 5%), masing-masing adalah 68,25%, 83,19%, dan 95,29%. Hal menunjukkan kelayakan EPID untuk mendeteksi efek interaksi.
Al Atawneh dkk.,[15]	Film Gafchromic	IMRT	Rata-rata pengukuran dosis adalah 93,8% $\pm$ 2,0% dengan tingkat keberhasilan yang sesuai interval kepercayaan antara 93,4% dan 96,7%, dimana dosis maksimum penyimpangan pasien kurang dari 4%.
Al-Tae'e dkk.,[16]	Dioda dan TLD	IMRT dan VMAT	Pengukuran dosis dengan dioda dan TLD akurat, dengan 92,2% sesuai harapan dan 97% di tiga area tubuh (otak, dada, pelvis). Namun, TLD kurang akurat dalam IMRT dibandingkan VMAT, terutama di tepi dosis ($\pm$ 10%).
Rudat dkk.,[17]	Film GafChromic	7 F-IMRT, TB-IMRT, dan 3D-CRT	Menggunakan dosimeter film GafChromic, teknik 7-field IMRT (7 F-IMRT) mengurangi dosis radiasi pada kulit pasien antara -11,8% dan -18,8% dibandingkan dengan TB-IMRT dan 3D-CRT, sehingga lebih aman untuk kulit.
Celi dkk.,[18]	EPID dengan EPIgray	3DCRT (<i>three-dimensional conformal radiation</i>)	Hasil pengukuran EPIgray menunjukkan rata-rata perbedaan dosis yang dihasilkan adalah sebagai berikut: untuk 3D

therapy), IMRT conformal, 2.0% ($\pm 4.9\%$); untuk IMRT, - dan VMAT 3,0% ($\pm 5,3\%$); dan untuk VMAT, -2,5% ($\pm 5,2\%$).

Penelitian-penelitian berikut digunakan untuk membandingkan penggunaan berbagai dosimeter dalam teknik VMAT dan IMRT. Penelitian Al-Tae dkk.,[16] menunjukkan bahwa dosimeter dioda dan TLD memiliki akurasi tinggi dengan kesesuaian lebih dari 90%, meskipun terdapat perbedaan dosis di area tepi tumor sekitar $\pm 10\%$. Sementara itu, penelitian Maya dkk.,[4] menemukan bahwa dosis kulit yang diukur menggunakan TLD dan OSLD pada teknik VMAT dan FIF adalah setara, meskipun VMAT cenderung memberikan dosis yang sedikit lebih tinggi. Secara keseluruhan, dosimeter TLD dan OSLD serta teknik VMAT menunjukkan hasil yang lebih baik dalam pengukuran dan pengiriman dosis radiasi, dengan VMAT lebih efektif dalam menjaga batasan dosis pada organ yang berisiko dibandingkan dengan IMRT.

Berdasarkan pada Tabel 1 diatas bahwa dosimeter film fleksibel dan GafChromic menunjukkan hasil yang baik dalam pengukuran dosis radiasi. Dibuktikan pada penelitian oleh Cho dkk.,[10] menunjukkan bahwa dosimeter film fleksibel memiliki sensitivitas tinggi dan stabilitas biologis tanpa ketergantungan energi atau laju dosis, menjadikannya pilihan yang baik untuk VMAT.

Penelitian lain oleh Baba & Singh dkk.,[13] menunjukkan bahwa IMRT lebih efektif dalam mengurangi dosis kulit dibandingkan 2DRT, menggunakan film GafChromic. Al Atawneh dkk.,[15] juga mendukung penggunaan film GafChromic untuk *in vivo dosimetry* pada kanker kepala dan leher dengan hasil akurat dan dalam batas toleransi yang dapat diterima. Rudat dkk.,[17] menemukan bahwa teknik 7-field IMRT (7 F-IMRT) mengurangi dosis radiasi pada kulit pasien dibandingkan TB-IMRT dan 3D-CRT. Secara keseluruhan, teknik VMAT dengan dosimeter film fleksibel dan IMRT dengan film GafChromic keduanya efektif, tetapi VMAT menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam menjaga batasan dosis pada organ yang berisiko.

Beberapa penelitian berikut yang menggunakan dosimeter EPID menunjukkan efektivitas yang signifikan dalam mendeteksi dan memverifikasi dosis radiasi dalam teknik VMAT dan IMRT:

Penelitian oleh Moustakis dkk.,[14] mengindikasikan bahwa EPID sangat baik dalam mendeteksi kesalahan dengan menggunakan metode evaluasi gamma, menunjukkan tingkat kelulusan yang tinggi untuk 3DCRT, IMRT, dan VMAT. Bossuyt dkk.,[8] juga menunjukkan bahwa sistem *dosimetry* berbasis EPID berhasil mengidentifikasi berbagai penyimpangan dalam pengaturan pasien dan pemberian pengobatan pada lebih dari 3000 pasien yang menerima VMAT, dengan tindakan yang diambil untuk fraksi yang gagal meningkatkan keselamatan dan hasil pengobatan.

Penelitian Fiagan dkk.,[7] menyoroti bahwa EPID efektif dalam mendeteksi penyimpangan dosis yang disebabkan oleh variasi pengisian kandung kemih dan rektum pada pasien kanker prostat, meskipun tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok yang menerima bantuan perawat dan kontrol. Ahmed dkk.,[5] menegaskan bahwa EPID bersama dengan sistem dosimetri Delta4 sangat akurat untuk verifikasi pengobatan IMRT dan RapidArc pada kanker prostat, dengan tingkat kesesuaian yang tinggi antara dosis terukur dan yang direncanakan. Esposito dkk.,[11] menyoroti bahwa dosimeter EPID sangat efektif dalam verifikasi dosis radiasi untuk berbagai teknik, termasuk VMAT, *Stereotactic Body Radiation Therapy* (SBRT), Modulasi Intensitas, dan Konformal 3D. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem dosimetri berbasis EPID seperti SoftDiso (SD), *Dosimetry Check* (DC), dan PerFRACTION (PF) memiliki tingkat kelulusan yang bervariasi, dengan OTL% (*Outside Tolerance Level*) sekitar 8,9% untuk SD, 18,0% untuk DC, dan 16,0% untuk PF. Kesalahan anatomi terutama terjadi pada kepala dan leher (9,0%) serta abdomen (9,0%).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa VMAT cenderung lebih unggul dibandingkan IMRT dalam beberapa aspek penting. VMAT menunjukkan tingkat kelulusan

yang lebih tinggi dalam mendeteksi kesalahan dosis dan memberikan distribusi dosis yang lebih konsisten, seperti yang ditemukan oleh Moustakis dkk.,[14]. Selain itu, VMAT memungkinkan pemberian dosis radiasi secara terus-menerus selama rotasi gantry, yang meningkatkan akurasi dan presisi pengobatan. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan Gamma Passing Rate dalam penelitian Fiagan dkk.,[7]. Penelitian oleh Bossuyt dkk.,[8] dan Esposito dkk.,[11] juga menunjukkan bahwa QA pra-perawatan dan pemilihan sistem dosimetri yang tepat mengurangi kesalahan anatomi, dengan VMAT menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam kondisi ini. Namun, tidak semua penelitian menjelaskan secara rinci mengapa atau dalam kondisi apa perbandingan dilakukan. Banyak studi lebih berfokus pada evaluasi efektivitas dosimeter EPID tanpa memberikan detail lengkap tentang konteks spesifik atau variabel yang mempengaruhi hasil perbandingan antara VMAT dan IMRT. Dengan demikian, ini membuktikan bahwa VMAT dengan dosimeter EPID umumnya lebih efektif dan unggul dalam verifikasi dosis radiasi dibandingkan IMRT.

Berdasarkan penelitian menggunakan dosimeter EPID dengan EPIgrayTM menunjukkan efektivitas yang signifikan dalam verifikasi dosis pada teknik VMAT dan IMRT. Mohsin dkk.,[6] menemukan bahwa 12 dari 15 pasien yang menjalani VMAT berada dalam rentang toleransi 10%. Untuk teknik VMAT, lebih dari 85% titik memenuhi tingkat toleransi 10% untuk 11 dari 15 pasien. Sedangkan untuk IMRT, 4 dari 6 pasien mencapai tingkat toleransi 10%, dan lebih dari 90% titik pengukuran memenuhi toleransi untuk 4 pasien. Hal ini menunjukkan bahwa EPIgrayTM efektif untuk memverifikasi dosimetri *in vivo*. Sementara itu, Radzi dkk.,[9] menunjukkan bahwa EPIgray melaporkan kesesuaian yang baik untuk linearitas, ukuran medan, *off-axis*, dan ketergantungan posisi dengan dosis TPS, dengan deviasi rata-rata kurang dari $\pm 2\%$ dan $\pm 7\%$ untuk berkas foton 6 MV dan 10 MV. Menunjukkan bahwa EPIgray adalah alat untuk verifikasi dosis pada IMRT dan VMAT.

Secara keseluruhan, hal ini menunjukkan bahwa EPIgrayTM efektif untuk memantau dosis radiasi dan memastikan akurasi dalam teknik VMAT, dengan sebagian besar hasil berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima. VMAT cenderung memberikan hasil yang lebih konsisten dan efektif dibandingkan dengan IMRT, sehingga teknik VMAT dapat dianggap lebih baik.

Penelitian-penelitian menggunakan dosimeter EPID dengan sistem SoftDiso, *Dosimetry Check*, dan PerFRACTION menunjukkan efektivitas dalam memverifikasi dosis radiasi pada teknik VMAT dan IMRT. Esposito dkk.,[11] menemukan bahwa sistem ini dapat mendeteksi kesalahan dosis dengan hasil yang konsisten di beberapa pusat. Teknik VMAT menunjukkan kesalahan yang lebih sedikit dibandingkan dengan IMRT. Penelitian Piermattei dkk.,[12] juga mengonfirmasi bahwa penggunaan EPID dengan SoftDiso efektif dalam mengidentifikasi kesalahan dosis, dengan VMAT memiliki tingkat kesalahan lebih rendah dibandingkan 3DCRT dan IMRT. Secara keseluruhan, VMAT lebih unggul dalam menjaga akurasi dan keselamatan dosis dibandingkan IMRT ketika menggunakan dosimeter EPID.

Topik terbaru yang dapat diajukan adalah penelitian yang berfokus pada pengembangan dan penggunaan dosimeter *Electronic Portal Imaging Device* (EPID) yang dipadukan dengan teknologi *deep learning* untuk meningkatkan akurasi pengukuran dosis radiasi langsung pada pasien (*in vivo dosimetry*) dalam terapi IMRT dan VMAT. Dengan kemampuan EPID mendeteksi distribusi dosis secara *real-time* dan *deep learning* menganalisis data dengan cepat dan akurat, dosis radiasi dapat diverifikasi lebih tepat selama pengobatan. Sehingga dapat memastikan bahwa dosis yang diberikan sesuai dengan rencana terapi dan melindungi organ sehat di sekitar area target. Penggunaan kombinasi EPID dan *deep learning* diharapkan meningkatkan akurasi *in vivo dosimetry* dibandingkan metode konvensional, sehingga kualitas pengobatan radioterapi dan keselamatan pasien dapat lebih ditingkatkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, teknik VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*) lebih unggul dibandingkan IMRT (*Intensity Modulated Radiation Therapy*). VMAT lebih

efektif dalam mendeteksi kesalahan dosis dan memberikan distribusi dosis yang lebih konsisten. Teknik ini juga memungkinkan pemberian dosis secara terus-menerus selama rotasi gantry, yang meningkatkan akurasi dan presisi pengobatan. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa VMAT lebih baik dalam mengurangi kesalahan anatomi dengan bantuan QA pra-perawatan dan sistem dosimetri yang tepat.

Penggunaan dosimeter seperti TLD, OSLD, dan EPID (dengan sistem SoftDiso, *Dosimetry Check*, PerFRACTION, dan EPIgrayTM) terbukti efektif dalam memverifikasi dosis radiasi pada teknik VMAT dan IMRT. Namun, VMAT dengan dosimeter EPID umumnya lebih unggul dalam verifikasi dosis radiasi dibandingkan IMRT. VMAT menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam meningkatkan keselamatan dosis radiasi yang diberikan kepada pasien dan akurasi pengobatan radioterapi, sehingga dianggap sebagai teknik yang lebih unggul untuk digunakan dalam *in vivo dosimetry* pada radioterapi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terselesainya jurnal ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada para peneliti terdahulu, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Mulawarman, terutama kepada Ibu Erlinda Ratnasari Putri, M.Si, dan Ibu Fatimah Kunti Hentihu, M.Si atas dukungan, bimbingan serta arahan yang diberikan dalam pembuatan artikel ini.

Penulis menyadari artikel ini masih memiliki kekurangan, sehingga terbuka untuk kritik dan saran yang membangun. Semoga jurnal ini dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan dan pembaca.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Zhang dkk., "A method for in vivo treatment verification of IMRT and VMAT based on electronic portal imaging device," *Radiat. Oncol.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1186/s13014-021-01953-9.
- [2] R. Fardela, A. M. Putri, I. Andriani, F. Diyona, R. Analia, and D. Mardiansyah, "Analisis Dosis OAR Pada Radioterapi Kanker Payudara Sinistra Di Rumah Sakit Universitas Andalas," *Nat. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 112–123, 2024, doi: 10.15548/nsc.v9i2.6785.
- [3] D. Opulskis, *Treatment Plan Verification Based On In Vivo Dose Measurements During External Beam Radiotherapy*. study: Kaunas University Of Technology, 2007.
- [4] A. M. Cardona-Maya, J. A. Rojas-López, A. Germanier, P. Murina, and D. Venencia, "Experimental determination of breast skin dose using volumetric modulated arc therapy and field-in-field treatment techniques," *J. Radiother. Pract.*, vol. 22, no. 2, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1017/S1460396922000292.
- [5] M. T. Ahmed, N. A. Baker, K. M. El-Shahat, M. F. Akl, and A. S. Shawata, "Verification of imrt and rapidarc localized prostate cancer treatment plans using epid and delta4 in vivo dosimetry methods," *Middle East J. Cancer*, vol. 12, no. 4, pp. 552–562, 2021, doi: 10.30476/mejc.2020.84706.1226.
- [6] G. H. Mohsin, N. Naslinda, N. Rizan, A. A. Rahman, and Y. M. Radzi, "Experiencing In-Vivo Dosimetry Verification in Malaysia: A Patient-Specific EPID-Based Approach," vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2024, [Online]. Available: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/emait>
- [7] Y. A. C. Fiagan dkk., "In vivo dosimetry for patients with prostate cancer to assess possible impact of bladder and rectum preparation," *Tech. Innov. Patient Support Radiat. Oncol.*, vol. 16, pp. 65–69, 2020, doi: 10.1016/j.tipsro.2020.10.005.
- [8] E. Bossuyt, R. Weytjens, D. Nevens, S. De Vos, and D. Verellen "Evaluation of automated pre-treatment and transit in-vivo dosimetry in radiotherapy using empirically determined parameters," *Phys. Imaging Radiat. Oncol.*, vol. 16, no. August, pp. 113–129, 2020, doi: 10.1016/j.phro.2020.09.011.
- [9] Y. Md Radzi, A. Abdul Rahman, N. N. Noor Rizan, N. N. Oskahar, and N. F. F. Abd Latif, "Characterization of a commercial EPID-based in-vivo dosimetry and its feasibility and

- implementation for treatment verification in Malaysia," *Polish J. Med. Phys. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 215–221, 2022, doi: 10.2478/pjmpe-2022-0025.
- [10] J. D. Cho dkk., "Flexible film dosimeter for in vivo dosimetry," *Med. Phys.*, vol. 47, no. 7, pp. 3204–3213, 2020, doi: 10.1002/mp.14162.
- [11] M. Esposito dkk., "Improving dose delivery accuracy with EPID in vivo dosimetry: results from a multicenter study," *Strahlentherapie und Onkol.*, vol. 197, no. 7, pp. 633–643, 2021, doi: 10.1007/s00066-021-01749-6.
- [12] A. Piermattei dkk., "A validation study of a dedicated software for an automated in vivo dosimetry control in radiotherapy," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 56, no. 10, pp. 1939–1947, 2018, doi: 10.1007/s11517-018-1822-3.
- [13] M. H. Baba and B. K. Singh, "In-vivo skin dose measurement using gafchromic EBT3 film dosimetry in the radiation therapy of Head and Neck cancers: 2DRT versus IMRT," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 170–174, 2022, doi: 10.1016/j.jrras.2022.05.019.
- [14] C. Moustakis, F. Ebrahimi Tazehmahalleh, K. Elsayad, F. Fezeu, and S. Scobioala, "A novel approach to SBRT patient quality assurance using EPID-based real-time transit dosimetry: A step to QA with in vivo EPID dosimetry," *Strahlentherapie und Onkol.*, vol. 196, no. 2, pp. 182–192, 2020, doi: 10.1007/s00066-019-01549-z.
- [15] S. J. Al Atawneh, "In-Vivo Dosimetry for the Head and Neck Cancer: Gafchromic Films," *J. Community Med. Public Heal. Reports*, vol. 3, no. 02, 2022, doi: 10.38207/jcmpshr/2022/feb03020221.
- [16] A. A. Al-Taee, W. A. F. Saleh, and M. M. Khalil, "In vivo dosimetry evaluation of semiconductor diodes and thermoluminescence detectors (TLDS) in advanced radiotherapy techniques," *Onkol. i Radioter.*, vol. 14, no. 4, pp. 1–12, 2020.
- [17] V. Rudat, A. Nour, A. A. Alaradi, A. Mohamed, and S. Altuwaijri, "In vivo surface dose measurement using GafChromic film dosimetry in breast cancer radiotherapy: Comparison of 7-field IMRT, tangential IMRT and tangential 3D-CRT," *Radiat. Oncol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1186/1748-717X-9-156.
- [18] S. Celi, E. Costa, C. Wessels, A. Mazal, A. Fourquet, and P. Francois, "EPID based in vivo dosimetry system: Clinical experience and results," *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 262–276, 2016, doi: 10.1120/jacmp.v17i3.6070.