



EVALUASI AKURASI *PATIENT SPECIFIC QUALITY ASSURANCE* (PSQA) PADA TEKNIK RADIOTERAPI KONVENSIONAL (3D-CRT) DAN MODERN (VMAT)

Fathul Jannah, Etmy Kurniasari, Oki Dimas Prasetya

Rumah Sakit Umum Daerah Prof. Dr. Margono Soekarjo, Purwokerto

e-mail: jannahfj26@gmail.com

ABSTRAK

Radioterapi merupakan salah satu modalitas utama dalam pengobatan kanker. Teknik radioterapi modern seperti *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT) memiliki konformalitas dosis pada target dan reduksi dosis pada organ sehat di sekitar target. Namun kompleksitas rencana perawatan pada teknik modern ini meningkatkan risiko ketidakakuratan dalam pengiriman dosis. *Patient-Specific Quality Assurance* (PSQA) merupakan prosedur audit dosis untuk memastikan dosis yang dikirim sesuai dengan yang direncanakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan akurasi PSQA antara teknik radioterapi konvensional 3D-CRT dan teknik modern VMAT pada kanker serviks. Evaluasi dilakukan dengan parameter *gamma index* 3%/3mm dan toleransi tingkat kepatuhan $\geq 90\%$ sesuai rekomendasi *The American Association of Physicist in Medicine Task Group* (AAPM TG-218). Sebanyak 25 sampel pasien dilakukan perencanaan dengan kedua teknik dan dilakukan PSQA menggunakan PTW Octavius. Hasil menunjukkan bahwa nilai rata-rata *gamma index* pada teknik konvensional 3D-CRT sebesar 98.12 ± 1.51 , sedangkan teknik modern VMAT sebesar 95.87 ± 2.27 . Hasil uji statistik (*paired t-test*) menunjukkan perbedaan yang signifikan antara keduanya. Meskipun demikian, seluruh data memenuhi standar kepatuhan $\geq 90\%$ dengan variasi yang lebih besar pada teknik modern VMAT. Penelitian ini menunjukkan bahwa teknik konvensional memiliki akurasi yang lebih tinggi. Faktor penyebab deviasi dosis pada teknik VMAT antara lain kompleksitas rencana dan dinamika pergerakan *multileaf collimator* (MLC) maupun *gantry*, serta *human error*.

Kata kunci: audit dosis, akurasi dosis, *gamma index*, PSQA, radioterapi.

ABSTRACT

Radiotherapy is one of the main modalities in cancer treatment. Modern radiotherapy techniques, such as *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT), achieve high target conformity while reducing dose to healthy organs. However, the complexity of treatment plans in this modern technique increases the risk of inaccuracy in dose delivery. *Patient-Specific Quality Assurance* (PSQA) is a dose-audit procedure that ensures the delivered dose matches the planned dose. This study aims to evaluate and compare the accuracy of PSQA between conventional 3D-CRT radiotherapy techniques and modern VMAT techniques in cervical cancer. The evaluation was carried out with *gamma index* parameters of 3%/3mm and a tolerance level of compliance $\geq 90\%$ as recommended by the American Association of Physicists in Medicine Task Group (AAPM TG-218). A total of 25 patient samples were planned with both techniques, and PSQA was performed using PTW Octavius. The results showed that the average *gamma index* for the conventional 3D-CRT technique was 98.12 ± 1.51 , while that for the modern VMAT technique was 95.87 ± 2.27 . A paired *t-test* showed a significant difference between the two. Nevertheless, all data met the compliance standard of $\geq 90\%$, with greater variation in the modern VMAT technique. This study demonstrated that the conventional technique had higher accuracy. Factors contributing to dose deviation in the VMAT technique included the complexity of the plan, the dynamics of the *multileaf collimator* (MLC) and *gantry* movements, and *human error*.

Keywords: dose audit, dose accuracy, *gamma index*, PSQA, radiotherapy.

I. PENDAHULUAN

Kanker merupakan salah satu masalah kesehatan global yang terus meningkat setiap tahunnya. Radioterapi, sebagai salah satu modalitas terapi kanker, memegang peranan penting dalam upaya kuratif maupun paliatif. Perkembangan teknologi radioterapi dalam beberapa dekade terakhir telah membawa transformasi besar, terutama dengan diperkenalkannya teknik modern seperti *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT). Teknik-teknik ini menawarkan keunggulan dalam hal konformitas dosis, reduksi dosis pada organ at risk (OAR) serta efisiensi waktu penyinaran sehingga memungkinkan peningkatan kontrol tumor dan pengurangan toksisitas pada jaringan sehat.

Namun kompleksitas rencana perawatan pada teknik radioterapi modern juga menghadirkan tantangan tersendiri, terutama dalam hal akurasi pengiriman dosis. *Patient-Specific Quality Assurance* (PSQA) menjadi komponen penting dalam proses radioterapi yaitu sebagai audit dosis untuk memverifikasi bahwa rencana penyinaran yang disusun pada *Treatment Planning System* (TPS) dapat direalisasikan secara klinis. *Gamma index* menjadi parameter utama dalam evaluasi PSQA dengan kriteria umum 3%/3 mm dan batas toleransi kepatuhan $\geq 90\%$ sesuai rekomendasi *The American Association of Physicist in Medicine Task Group* (AAPM TG-218).

Meskipun teknik radioterapi modern seperti VMAT secara teori memiliki efisiensi dan efektivitas yang lebih tinggi, penting untuk dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap akurasi pelaksanaannya dibandingkan dengan teknik konvensional 3D-CRT yang lebih sederhana untuk memastikan bahwa keunggulan klinis yang ditawarkan tidak mengorbankan akurasi pengiriman dosis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan akurasi PSQA antara teknik konvensional (3D-CRT) dan teknik radioterapi modern (VMAT). Dengan menggunakan metode pengukuran yang konsisten dan alat dosimetri yang canggih, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru tentang faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi PSQA, serta rekomendasi untuk meningkatkan kualitas dan keselamatan radioterapi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Kanker merupakan penyakit yang ditandai

dengan adanya pertumbuhan sel yang tidak terkendali dan memiliki kemampuan untuk menyerang jaringan di sekitarnya serta menyebar ke bagian tubuh lain (metastasis). Berdasarkan data dari *Global Cancer Observatory*, terdapat lebih dari 408.661 kasus kanker baru dengan tingkat kematian 242.988 kasus pada tahun 2022 [1]. Radioterapi telah terbukti menjadi modalitas pengobatan kanker yang sangat efektif, baik sendiri atau dikombinasikan dengan pembedahan dan kemoterapi. Radioterapi bertujuan untuk memberikan dosis radiasi yang dapat membunuh sel tumor dengan meminimalkan dosis pada jaringan sehat disekitarnya [2].

Radioterapi telah mengalami perkembangan dengan diperkenalkannya teknik-teknik modern yang semakin canggih seperti *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT). Teknik modern memungkinkan reduksi dosis pada organ sehat disekitar target dibandingkan dengan 3D-CRT dengan mempertahankan dosis konformal dan homogen pada target [3], [4]. Konsep awal VMAT diperkenalkan oleh Cedric Yu pada tahun 1995 [5]. VMAT merupakan perkembangan dari *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT) dimana gantry berputar selama radiasi diberikan. Distribusi dosis dibentuk oleh tiga variabel dinamis: MLC, kecepatan rotasi gantry, dan laju dosis. Kualitas teknik VMAT sebanding dengan IMRT dengan keuntungan seperti waktu yang lebih singkat dan *Monitor Unit* (MU) yang lebih sedikit [6]. Namun, kompleksitas rencana perawatan pada teknik modern ini juga meningkatkan risiko ketidakakuratan dalam pengiriman dosis, sehingga memerlukan prosedur audit dosis radioterapi yaitu dengan *Patient-Specific Quality Assurance* (PSQA) [7].

Berdasarkan Pasal 46 Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2023, pemegang izin diwajibkan mengambil langkah-langkah untuk mencegah terjadinya kesalahan dalam pemberian dosis pasien selama paparan medis [8]. PSQA merupakan komponen esensial dalam proses radioterapi untuk memastikan bahwa dosis yang terencana sesuai dengan dosis yang terkirim.

Proses ini melibatkan verifikasi dosis dan distribusi dosis melalui pengukuran atau simulasi independen, yang biasanya dilakukan sebelum pengobatan dimulai. PSQA menjadi semakin penting dalam teknik radioterapi modern karena kompleksitas rencana perawatan

yang melibatkan modulasi intensitas dan gerakan dinamis gantry [9], [10].

Kepatuhan terhadap protokol terapi radiasi sangat penting untuk memastikan keberhasilan pengobatan. Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), ketidakpatuhan terhadap protokol dapat menyebabkan *underdosis* atau *overdosis* radiasi, yang berpotensi mengurangi efektivitas terapi atau menimbulkan efek samping serius bagi pasien. *Underdosis* dapat menyebabkan kekambuhan kanker, sementara *overdosis* dapat merusak jaringan sehat di sekitar tumor. Oleh karena itu, pemantauan ketat terhadap dosis radiasi yang diberikan kepada pasien menjadi hal yang krusial [11].

Kesesuaian antara dosis yang diukur dan dihitung biasanya dibandingkan berdasarkan poin, dengan mengevaluasi dosis yang diserap dan lokasinya. Dalam evaluasinya ada yang disebut dengan *Dose Difference* dan *Distance-to-Agreement*. *Dose Difference* (DD) yaitu membandingkan dosis terukur di setiap titik dengan dosis terhitung yang sesuai di titik tersebut. *Distance-to-Agreement* (DTA) yaitu mengukur jarak antara titik pada distribusi dosis terukur dan titik terdekat pada distribusi terhitung dengan dosis yang sama. *Gamma Index* (GI) mencoba menggabungkan DD dan DTA menjadi matrik tunggal yang dapat digunakan di kedua area gradien dosis dan dosis homogen. Umumnya evaluasi menggunakan DD 2-5% dan DTA 2-3 mm. *The American Association of Physicist in Medicine Task Group* (AAPM TG-218) merekomendasikan kriteria lolos yaitu sebesar 90% atau 95% [12].

Meskipun riset mengenai PSQA semakin banyak, namun sebagian besar studi terfokus pada teknik tertentu tanpa membandingkannya secara langsung dalam konteks yang sama. Untuk mengisi gap tersebut, kebaruan penelitian ini yaitu dengan mengevaluasi dan membandingkan secara langsung akurasi PSQA antara teknik konvensional 3D-CRT dan teknik modern VMAT menggunakan metode pengukuran yang konsisten dan alat dosimetri yang canggih.

III. METODE

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Instalasi Radioterapi RSUD Prof. Dr. Margono Soekarjo Purwokerto. Pengambilan data dan analisis dilakukan pada bulan April sampai dengan Juli 2025.

b. Alat dan Bahan

Penelitian ini melibatkan 25 pasien kanker

serviks. Masing-masing pasien direncanakan terapi radiasi menggunakan dua teknik, yaitu teknik konvensional (3D- CRT) dan teknik modern (VMAT), sehingga diperoleh dua perencanaan untuk masing- masing pasien.

Peralatan yang diperlukan pada penelitian ini yaitu Pesawat LINAC dan PTW Octavius untuk audit dosis. Laptop dan beberapa perangkat lunak untuk pengolahan data. Perangkat lunak pengolah data yang digunakan antara lain *Monaco*, *Verisoft*, Excel dan SSPS.

c. Pelaksanaan Kegiatan

1. Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan, dilakukan identifikasi masalah dan tujuan penelitian. Penyusunan proposal penelitian dilakukan berdasarkan studi literatur dan pengumpulan referensi yang terkait dengan penelitian. Langkah berikutnya pengumpulan sampel pasien yang sesuai dengan kriteria. Sampel kemudian dilakukan *planning* menggunakan Monaco untuk dua teknik yang berbeda.

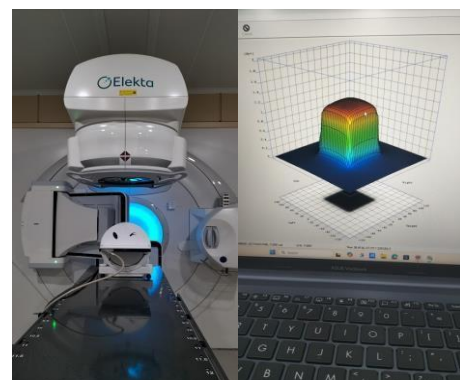
2. Pelaksanaan PSQA

Pengukuran PSQA menggunakan PTW Octavius untuk data perencanaan yang telah dibuat. PSQA dilakukan dengan gantry yang rotasi menggunakan bantuan *inclinometer* untuk menyesuaikan sudut gantry.

Evaluasi dilakukan menggunakan software Verisoft dengan parameter gamma index 3%/3 mm dan batas kelulusan $\geq 90\%$ sesuai rekomendasi AAPM TG-218. data *gamma index* dievaluasi menggunakan microsoft excel dan SPSS untuk pengujian statistik.

3. Pengolahan dan Analisis Data

Analisis yang dilakukan meliputi evaluasi tingkat kepatuhan hasil PSQA terhadap standar toleransi yang ditetapkan, membandingkan akurasi PSQA antara teknik 3D-CRT dan VMAT, serta evaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi deviasi dosis.teknik, dan tidak menghambat pencapaian tujuan utama penelitian.



Gambar 1. Pelaksanaan PSQA

Pengolahan data menggunakan *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versi 31.0. Uji statistik dilakukan dengan uji normalitas, uji homogenitas varian dan uji beda (*paired t-test*)

4. Evaluasi dan Penyusunan

Laporan Berdasarkan hasil analisis, disusun kesimpulan terkait akurasi masing-masing teknik serta faktor-faktor yang memengaruhi deviasi dosis. Tahap penyusunan laporan meliputi penyusunan draft laporan penelitian, revisi laporan berdasarkan masukan, dan penulisan karya tulis ilmiah

d. Kendala yang Dihadapi

Selama pelaksanaan penelitian, terdapat beberapa kendala teknis dan non-teknis yang dihadapi, antara lain:

1. Variasi anatomi pasien

Meskipun seluruh data menggunakan satu kasus yang sama yaitu kanker serviks, terdapat perbedaan anatomi maupun target pada masing-masing data yang menyebabkan variasi dalam desain perencanaan dan kompleksitas teknik.

2. Keterbatasan data tambahan

Beberapa parameter seperti kompleksitas MLC dan MU tidak seluruhnya dapat dievaluasi secara rinci karena keterbatasan manajemen waktu dengan pelayanan. Meskipun demikian, kendala-kendala tersebut tidak mempengaruhi integritas data utama, yaitu nilai gamma index.

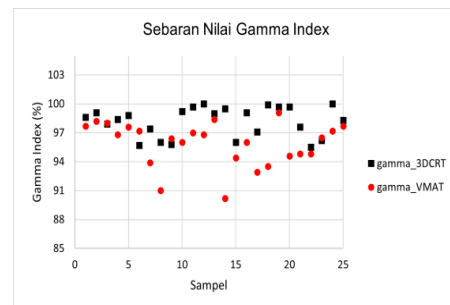
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Evaluasi Akurasi PSQA

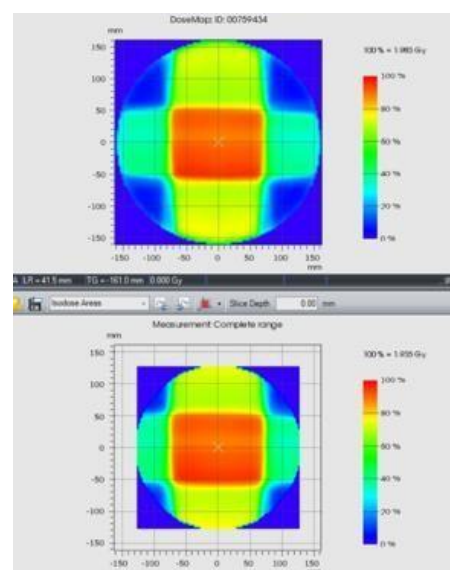
Penelitian ini melibatkan 25 sampel pasien kanker serviks yang masing-masing direncanakan dengan dua teknik radioterapi, yaitu 3D-CRT dan VMAT. Evaluasi akurasi dilakukan dengan menggunakan nilai gamma index 3%/3 mm, dan kriteria tingkat kepatuhan *action limit* adalah $\geq 90\%$ sesuai rekomendasi AAPM TG-218. Gambar 2 merepresentasikan sebaran hasil *gamma index* pada kedua teknik. *Gamma index* merupakan parameter evaluasi kualitas penyampaian dosis radiasi, dengan nilai $\geq 90\%$ umumnya menunjukkan kesesuaian antara dosis yang direncanakan dan yang diberikan.

Dari grafik di Gambar 2 terlihat bahwa nilai *gamma index* untuk teknik 3D-CRT (simbol kotak hitam) cenderung lebih tinggi dan stabil dibandingkan VMAT (simbol bulat merah), yang menunjukkan fluktuasinya lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa teknik 3D-CRT memberikan hasil yang lebih konsisten dalam pencapaian dosis sesuai protokol dibandingkan VMAT, meskipun keduanya tetap berada dalam kisaran yang

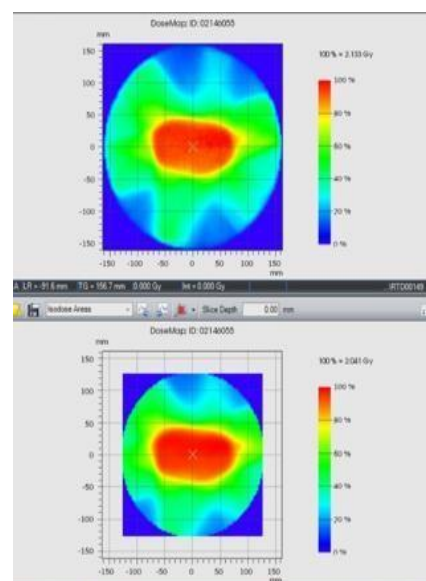
dapat diterima secara klinis. Temuan ini mendukung evaluasi terhadap kepatuhan protokol terapi radiasi eksternal dalam menjamin akurasi penyampaian dosis.



Gambar 2. Sebaran dosis terukur terhadap dosis resep pada audit dosis Cobalt-60



Gambar 3. Visualisasi distribusi dosis hasil perencanaan (atas) dan pengukuran PSQA (bawah) pada teknik 3DCRT



Gambar 4. Visualisasi distribusi dosis hasil perencanaan (atas) dan pengukuran PSQA (bawah) pada teknik VMAT

Tabel 1. Statistik deskriptif hasil pengukuran

Parameter	Nilai rata-rata	Standar Deviasi
Mean $\pm$ SD	98.12 $\pm$ 1.51	95.87 $\pm$ 2.27
Rentang nilai	95.5 – 100	90.2 – 99.1
Tingkat kepatuhan ($\geq 90\%$)	100%	100%
Uji normalitas (Shapiro-Wilk)	0.017	0.05
Uji <i>paired t-test</i>	t = 4.73 ; p<0.001	

Berdasarkan analisis deskriptif, nilai rata-rata *gamma index* untuk teknik 3DCRT adalah 98.12 $\pm$ 1.51, sedangkan pada teknik VMAT, nilai rata-ratanya lebih rendah yaitu 95.87 $\pm$ 2.27. Penelitian ini menunjukkan bahwa kedua teknik radioterapi, baik konvensional (3D-CRT) maupun modern (VMAT), menghasilkan nilai *gamma index* di atas batas tingkat kepatuhan yang ditetapkan yaitu $\geq 90\%$.

Berdasarkan hasil uji *paired t-test* sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1, terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara nilai *gamma index* teknik 3D-CRT dan VMAT (p < 0.001). Teknik 3D-CRT menunjukkan nilai *gamma index* yang lebih tinggi dan lebih konsisten dibandingkan VMAT.

Teknik 3D-CRT lebih stabil karena menggunakan bidang penyinaran statis dan tanpa modifikasi intensitas, sehingga lebih minim kesalahan dalam pengiriman dosis. Sementara itu, VMAT melibatkan pengaturan dinamis yang kompleks, seperti pergerakan *gantry*, perubahan bentuk kolimator, dan variasi laju dosis secara simultan, yang dapat meningkatkan risiko deviasi dosis.

b. Faktor Yang Memengaruhi

Dalam teknik radioterapi modern seperti VMAT, akurasi antara dosis yang direncanakan dan yang terukur menjadi sangat penting untuk menjamin efektivitas pengobatan sekaligus meminimalkan risiko terhadap jaringan sehat. Berdasarkan data PSQA, secara umum hasil QA menunjukkan passing rate *gamma index* yang tinggi, terdapat beberapa kasus di mana perbedaan dosis masih terdeteksi. Fenomena ini disebabkan oleh berbagai faktor yang memengaruhi ketepatan pengiriman dosis pada VMAT.

Salah satu faktor utama adalah kompleksitas perencanaan dan penyampaian dosis pada VMAT. Teknik ini menggabungkan rotasi *gantry*, modulasi intensitas berkas, serta gerakan dinamis *multileaf collimator* (MLC)

secara simultan. Interaksi dari ketiga komponen ini menciptakan variasi spasial dan temporal yang sangat tinggi dalam distribusi dosis, sehingga kesalahan sekecil apa pun dalam sinkronisasi sistem akan menyebabkan ketidaksesuaian antara dosis terencana dan terukur.

Secara visual dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4, yaitu warna merah menunjukkan area dosis tinggi, sedangkan biru menunjukkan dosis rendah. Perbedaan pola distribusi ini menunjukkan bahwa meskipun kedua teknik memenuhi syarat akurasi dosis secara umum, teknik VMAT membutuhkan verifikasi QA yang lebih ketat karena kompleksitas bentuk dan dinamika penyampaian dosisnya. Sementara itu, teknik 3DCRT yang lebih sederhana memberikan kestabilan dan homogenitas distribusi, menjadikannya relatif lebih mudah untuk dievaluasi secara dosimetrik.

Kualitas perhitungan algoritma TPS juga turut menentukan kesesuaian dosis. Algoritma dengan tingkat akurasi rendah dalam memodelkan interaksi foton pada jaringan yang berbeda-beda akan memengaruhi hasil perhitungan dosis, sehingga berbeda dengan pengukuran aktual yang dilakukan dengan alat dosimetri. Ketepatan sistem akuisisi data QA, seperti sistem EPID (*Electronic Portal Imaging Device*) atau detektor 2D array, juga berperan. Resolusi rendah atau kesalahan posisi phantom dapat menyebabkan pengukuran yang tidak merepresentasikan distribusi aktual secara utuh, sehingga menciptakan artefak ketidaksesuaian pada evaluasi *gamma index*.

Selain faktor teknis, faktor manusia (*human error*) juga menjadi variabel yang tidak bisa diabaikan. Kesalahan dalam penempatan phantom, pengaturan parameter verifikasi, atau pemilihan kriteria evaluasi *gamma* yang tidak tepat dapat mempengaruhi validitas hasil QA. Oleh karena itu, standarisasi prosedur QA dan pelatihan PSQA sangat penting untuk menjaga kualitas hasil.

Dari sudut pandang praktis, hasil ini mengindikasikan bahwa pemilihan teknik sebaiknya disesuaikan dengan tujuan klinis, sumber daya, kemampuan alat dan kesiapan sistem QA. Teknik 3D-CRT cocok digunakan pada kasus dengan struktur anatomi sederhana dan fasilitas QA yang terbatas karena memerlukan lebih sedikit variabel kompleks dan prosedur QA fisik yang lebih sederhana sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Begnozzi et al. [13].

Di sisi lain, teknik VMAT menawarkan

konformitas dosis lebih tinggi dan efisiensi waktu terutama dalam kasus target kompleks atau target yang dekat dengan organ risiko. Namun, karena kompleksitas rencananya, VMAT memerlukan validasi PSQA yang lebih ketat, dengan *gamma passing rate* sebagai alat ukur utama efektivitas pengiriman dosis [14].

KESIMPULAN

Berdasarkan data yang didapat serta analisis yang dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Akurasi PSQA teknik konvensional (3D-CRT) lebih tinggi secara signifikan dibandingkan teknik modern (VMAT), dengan rata-rata nilai *gamma index* 98.12% untuk 3D-CRT dan 95.87% untuk VMAT ($p < 0.001$).
2. Seluruh hasil pengukuran *gamma index* untuk kedua teknik memenuhi tingkat kepatuhan ($\geq 90\%$), sesuai rekomendasi AAPM TG-218, yang menunjukkan bahwa baik teknik konvensional maupun modern aman digunakan dalam praktik klinis.
3. Faktor-faktor seperti bentuk target, jumlah monitor unit (MU), dan tingkat kompleksitas rencana, kualitas perhitungan TPS, ketepatan akuisisi data dan *human error* seperti penempatan phantom berpotensi memengaruhi akurasi PSQA.

REKOMENDASI

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa rekomendasi antara lain:

1. Audit dosis eksternal perlu dilakukan secara berkala dan menjadi bagian dari *Quality Assurance* (QA) pada fasilitas radioterapi
2. Perlu standarisasi prosedur QA dan pelatihan PSQA sangat penting untuk menjaga kualitas hasil PSQA
3. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk kasus kanker lain dan teknik lain Dengan dilaksanakannya audit dosis diharapkan mutu layanan radioterapi dapat terus ditingkatkan dan memberikan hasil terapi yang optimal dan efektif bagi pasien kanker di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada RSUD Prof. Dr. Margono yang telah memberikan fasilitas sehingga penelitian ini dapat dilakukan. Terima kasih kepada keluarga besar radioterapi yang mendukung dan membantu penelitian ini.

Terima kasih kepada seluruh rekan-rekan dan pihak-pihak terkait sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Ferlay *et al.*, "Global Cancer Observatory: Cancer Today," Global Cancer Observatory. Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://gco.iarc.who.int/today/>
- [2] F. M. Khan and J. P. Gibbons (Jr.), *Khan's The Physics of Radiation Therapy*. Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [3] B. Cho, "Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective," *Radiat. Oncol. J.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–10, Mar. 2018, doi: 10.3857/roj.2018.00122.
- [4] S. Webb, "The physical basis of IMRT and inverse planning," *Br. J. Radiol.*, vol. 76, no. 910, pp. 678–689, Oct. 2003, doi: 10.1259/bjr/65676879.
- [5] C. X. Yu, "Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy," *Phys. Med. Biol.*, vol. 40, no. 9, pp. 1435–1449, Sep. 1995, doi: 10.1088/0031-9155/40/9/004.
- [6] A. Nainggolan and S. A. Pawiro, "Dosimetric Evaluation of Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) and Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) Using AAPM TG 119 Protocol," *J. Biomed. Phys. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 395–408, Aug. 2019, doi: 10.31661/jbpe.v0i0.839.
- [7] Intensity Modulated Radiation Therapy Collaborative Working Group, "Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest," *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, vol. 51, no. 4, pp. 880–914, Nov. 2001, doi:10.1016/s0360-3016(01)01749-7.
- [8] Peraturan Pemerintah, "Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif." Accessed: Mar. 21, 2024. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/265188/pp-no-45-tahun-2023>
- [9] S. Douama *et al.*, "Validation and comparison of intensity modulated radiation therapy patient plans with Octavius 4D Phantom using the Gamma Index analysis in 2D and 3D," *Onkol.Radioter.*, vol. 15, no. 8, pp. 1–5,

- Aug.2021.
- [10] J. M. Park, J. Kim, and S.-Y. Park, "Modulation indices and plan delivery accuracy of volumetric modulated arc therapy," *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 20, no. 6, pp. 12–22, 2019, doi:10.1002/acm2.12589.
 - [11] WHO, Radiotherapy Risk Profile: Technical Manual. In WHO/IER/PSP/2008. Switzerland: WHO Press, 2008. [Online]. Available: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/patient-safety/radiotherapy/090715-who-radiotherapy_risk_profile.pdf
 - [12] M. Miften et al., "Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of Task Group No. 218," *Med. Phys.*, vol. 45, no. 4, pp. e53–e83, 2018, doi: 10.1002/mp.12810.
 - [13] L. Begnozzi et al., "Quality assurance of 3D-CRT: Indications and difficulties in their applications," *Crit. Rev. Oncol. Hematol.*, vol. 70, no. 1, pp. 24–38, Apr.2009, doi:10.1016/j.critrevonc.2008.07.016.
 - [14] L. Chen et al., "Pretreatment patient-specific quality assurance prediction based on 1D complexity metrics and 3D planning dose: classification, gamma passing rates, and DVH metrics," *Radiat. Oncol. Lond. Engl.*, vol. 18, p. 192, Nov. 2023, doi: 10.1186/s13014-023-02376-4