Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 4, Juli 2026, hal. 430 – 436
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.4.430-436.2026

Open Access

Perbandingan Hasil Simulasi *Software* Primo dengan Pengukuran Eksperimen pada *Quality Assurance* Berkas Foton *Linear Accelerator* Varian Clinac CX

Wulandari Roelyant[1], Rico Adrial[1*], M. Arif Efendi[2]
[1]Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Indonesia
[2]Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 20 Februari 2026
Direvisi: 16 April 2026
Diterima: 31 Juli 2026

Kata kunci:
Dose profile
Indeks gamma
Linear accelerator
Percentage Depth Dose
Quality assurance

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan membandingkan hasil simulasi Monte Carlo menggunakan perangkat lunak PRIMO dengan hasil pengukuran eksperimen pada proses QA berkas foton *Linear Accelerator* (LINAC) Varian Clinac CX energi 6 MV berdasarkan parameter *Percentage Depth Dose* (PDD), *dose profile*, dan indeks gamma. Pengukuran distribusi dosis dilakukan menggunakan fantom air pada konfigurasi *Source to Surface Distance* (SSD) 100 cm dengan ukuran lapangan (4×4) cm², (10×10) cm², dan (40×40) cm². Simulasi Monte Carlo dilakukan menggunakan perangkat lunak PRIMO dengan memodelkan geometri kepala LINAC Varian Clinac CX serta fantom air sesuai dengan kondisi eksperimen. Analisis dilakukan dengan membandingkan kurva PDD dan *dose profile* antara hasil simulasi dan pengukuran, serta evaluasi kesesuaian menggunakan indeks gamma dengan kriteria toleransi 2%/2 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurva PDD hasil simulasi memiliki kesesuian yang baik terhadap hasil pengukuran. Nilai *Gamma Passing Rate* (GPR) diperoleh sebesar 97,98% untuk lapangan (4×4) cm², 97,43% untuk lapangan (10×10) cm², dan 87% untuk lapangan (40×40) cm². Analisis *dose profile* menunjukkan kesesuain yang baik pada daerah tengah lapangan, sedangkan perbedaan yang lebih besar teramati pada daerah penumbra dan kedalaman dangkal. Secara keseluruhan, simulasi Monte Carlo berbasis PRIMO memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimen dan dapat digunakan sebagai metode verifikasi independen dalam pelaksanaan QA berkas foton LINAC varian Clinac CX energi 6 MV.

Keywords:
Dose profile
Indeks gamma
Linear accelerator
Percentage Depth Dose
Quality assurance

Penulis Korespondensi:
Rico Adrial
Email: *ricoadrial@sci.unand.ac.id*

This study aims to compare Monte Carlo simulation results obtained using PRIMO software with experimental measurements for the photon beam Quality Assurance (QA) of a Varian Clinac CX Linear Accelerator (LINAC) at 6 MV energy, based on Percentage Depth Dose (PDD) parameters, dose profiles, and the gamma index. Dose distribution measurements were performed using a water phantom at a Source-to-Surface Distance (SSD) of 100 cm with field sizes of (4×4) cm², (10×10) cm², and (40×40) cm². Monte Carlo simulations were conducted using PRIMO software by modeling the Varian Clinac CX LINAC head geometry and the water phantom to match experimental conditions. Analysis involved comparing PDD curves and dose profiles between simulation and measurement results, as well as evaluating agreement using the gamma index with a tolerance criterion of 2%/2 mm. The results indicate good agreement between the simulated PDD curves and the measured data. Gamma Passing Rate (GPR) values were 97.98% for the (4×4) cm² field, 97.43% for the (10×10) cm² field, and 87% for the (40×40) cm² field. Dose profile analysis showed good agreement in the central field region, while larger discrepancies were observed in the penumbra region and at shallow depths. Overall, the PRIMO-based Monte Carlo simulation demonstrates good agreement with experimental results and can serve as an independent verification method for photon beam QA of the Varian Clinac CX LINAC at 6 MV energy.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Kanker adalah kondisi patologis yang ditandai oleh proliferasi sel-sel abnormal secara tidak terkendali, yang berpotensi menimbulkan fatalitas apabila tidak ditangani secara tepat. Walaupun etiologi sejumlah jenis kanker masih belum sepenuhnya terungkap, berbagai faktor risiko telah teridentifikasi dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya penyakit ini, antara lain kebiasaan merokok, mutasi genetik, gaya hidup sedenter, serta pola makan tinggi makanan olahan yang mendukung progresivitas kanker (American Cancer Society, 2024).

Salah satu modalitas terapi kanker yang telah terbukti efektif adalah radioterapi, yakni pemanfaatan radiasi pengion untuk merusak atau menghambat proliferasi sel maligna. Radiasi yang digunakan dapat berupa foton (sinar-X atau sinar gamma), elektron, maupun partikel bermassa lainnya, yang difokuskan secara presisi ke wilayah tumor dengan prinsip memaksimalkan dosis terapeutik pada target sambil meminimalkan eksposur pada jaringan sehat di sekitarnya (Khan, 2019).

Linear Accelerator (LINAC) adalah perangkat utama yang digunakan untuk menghasilkan berkas radiasi foton energi tinggi dalam radioterapi modern (Podgorsak, 2016). Varian Clinac CX merupakan salah satu model LINAC yang hingga saat ini masih banyak digunakan di fasilitas kesehatan, khususnya di negara berkembang, karena keandalannya dalam menghasilkan berkas energi 6 MV dan 10 MV (Siregar et al., 2019). Dalam praktik radioterapi, berkas foton umumnya tersedia pada variasi energi 6 MV dan 10 MV, sedangkan berkas elektron memiliki rentang energi yang lebih luas, yaitu 4, 6, 9, 12, 15, dan 18 MeV. Pemilihan jenis berkas disesuaikan dengan lokasi serta karakteristik tumor, di mana berkas foton lebih efektif untuk penanganan lesi malignan yang berada di jaringan dalam, seperti kanker payudara, serviks, dan nasofaring. Sebaliknya, berkas elektron dengan kemampuan penetrasi yang terbatas lebih sesuai digunakan untuk terapi kanker kulit yang bersifat superfisial (Pratiwi, 2010).

Ketepatan dosis yang diberikan kepada pasien dalam terapi radiasi sangat dipengaruhi oleh kualitas berkas foton yang dihasilkan oleh LINAC, yang dikontrol melalui penerapan protokol standar yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing sistem radioterapi. Salah satu metode evaluasi kualitas berkas ini adalah melalui pengukuran *Percentage Depth Dose* (PDD), *Dose Profile* dan dosis absolut (*Absolute Dose*). PDD merupakan rasio antara dosis radiasi pada suatu kedalaman tertentu dibandingkan dengan dosis maksimum, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase (Williams et al, 1993). *Dose Profile* menggambarkan distribusi dosis radiasi pada arah lateral berkas dan digunakan untuk menilai homogenitas dosis serta menentukan batas daerah iradiasi. Parameter utama yang dianalisis meliputi *Full Width at Half Maximum* (FWHM), karakteristik penurunan dosis pada daerah penumbra, dan penyebaran dosis di luar medan iradiasi utama (Podgorsak, 2005).

Indeks gamma secara luas diterapkan sebagai alat verifikasi pada prosedur radioterapi. Metode ini memungkinkan perbandingan kuantitatif antara dua distribusi dosis radiasi, biasanya antara distribusi dosis yang direncanakan melalui sistem perencanaan radioterapi dan dosis yang diperoleh melalui pengukuran menggunakan alat QA (Daniel A. Low, a) William B. Harms, Sasa Mutic, 1998). Dengan menetapkan kriteria ambang AAPM Task Group 142 batas tertentu, seperti 3%/3 mm atau 2%/2 mm, yang menunjukkan toleransi perbedaan dosis dan jarak antar titik. Setiap titik dalam bidang pengukuran kemudian dianalisis, dan nilai gamma dihitung untuk menentukan apakah titik tersebut memenuhi kriteria ($\gamma \leq 1$) (Klein et al, 2009).

Aplikasi radioterapi dalam mensimulasikan kinerja LINAC dirancang khusus menggunakan metode Monte Carlo. Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak PRIMO, yaitu program simulasi berbasis Monte Carlo yang independen dan otomatis untuk perhitungan distribusi dosis dan pemodelan LINAC, dengan antarmuka grafis yang mudah digunakan. PRIMO memanfaatkan sistem PENELOPE untuk mensimulasikan berbagai jenis LINAC, termasuk Varian dan Elekta, serta menghitung distribusi dosis pada fantom air (Sempau, 2015).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, metode simulasi Monte Carlo menggunakan perangkat lunak PRIMO telah banyak digunakan untuk memodelkan karakteristik berkas foton pada berbagai jenis *Linear Accelerator* (LINAC) serta mengevaluasi distribusi dosis radiasi dalam radioterapi. Penelitian oleh Efendi et al. (2017), Sarin et al. (2020), dan Altuwayrish et al. (2022) menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo mampu menghasilkan distribusi dosis yang memiliki tingkat kesesuaian tinggi dengan data eksperimen, khususnya pada parameter *Percentage Depth Dose* (PDD), profil dosis, dan indeks gamma. Hasil tersebut menunjukkan bahwa PRIMO berpotensi menjadi alat verifikasi independen yang andal dalam proses *Quality Assurance* (QA) radioterapi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih

berfokus pada jenis LINAC tertentu seperti *TrueBeam* STx, Clinac iX, dan Clinac 600C, sehingga performa simulasi PRIMO pada tipe LINAC lainnya masih memerlukan kajian lebih lanjut. Selain itu, penelitian yang secara khusus membandingkan hasil simulasi Monte Carlo menggunakan PRIMO dengan pengukuran eksperimen pada proses *Quality Assurance* berkas foton LINAC Varian Clinac CX masih terbatas. Padahal, Clinac CX merupakan salah satu tipe LINAC yang masih banyak digunakan di fasilitas radioterapi sehingga verifikasi kualitas berkas radiasi sangat penting untuk menjamin ketepatan dosis terapi.

II. METODE

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Instalasi Onkologi Rumah Sakit Universitas Andalas, sedangkan pengolahan data simulasi menggunakan perangkat lunak PRIMO dilakukan di Laboratorium Fisika Lanjut Universitas Andalas. Penelitian berlangsung selama enam bulan, yaitu pada periode Juli hingga Desember 2025.

2.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa komponen utama yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam proses pengukuran dan simulasi dosimetri. Pertama, *Linear Accelerator* (LINAC) Varian Clinac CX dengan energi foton 6 MV berfungsi sebagai sumber radiasi eksternal untuk menghasilkan berkas foton terapeutik yang stabil dan terkendali selama pengambilan data. Kedua, fantom air berukuran 48×48×41 cm^3 berperan sebagai medium simulasi jaringan manusia yang menyediakan lingkungan homogen, bebas hamburan berlebih, dan mudah direproduksi untuk pengukuran distribusi dosis secara akurat. Ketiga, digunakan detektor dosis berupa ion chamber tipe *reference* dan *field*; *ion chamber reference* berfungsi sebagai standar untuk kalibrasi dan penentuan dosis absolut, sedangkan *ion chamber field* berperan dalam pemetaan profil berkas, penumbra, serta distribusi dosis relatif pada berbagai kedalaman dan posisi lateral. Keempat, *Computer Control Unit* (CCU) berfungsi sebagai antarmuka kendali dan pemantauan operasional LINAC, termasuk pengaturan parameter berkas, sinkronisasi waktu penyinaran, serta komunikasi dengan sistem akuisisi data. Kelima, perangkat lunak MyQA digunakan untuk akuisisi, pengolahan, dan visualisasi data dosimetri secara real-time, khususnya dalam prosedur *quality assurance* (QA), kalibrasi silang detektor, dan karakterisasi berkas foton. Terakhir, perangkat lunak PRIMO dimanfaatkan untuk menjalankan simulasi Monte Carlo guna memodelkan transportasi radiasi secara stokastik, menghitung distribusi dosis tiga dimensi secara komputasional, serta memvalidasi keakuratan hasil pengukuran eksperimental terhadap model teoritis.

2.3 Prosedur

Penelitian ini menggunakan 2 proses pengambilan data berupa data eksperimen dan data simulasi. Pengukuran distribusi dosis dilakukan dengan konfigurasi *source to surface distance* (SSD) 100 cm pada tiga variasi ukuran lapangan : (4×4) cm^2, (10×10) cm^2, (40×40) cm^2. Parameter yang di ukur meliputi:

1. *Percentage depth dose* (PDD) pada sumbu sentral (sumbu Z).
2. *Cross-plane beam profile* (sumbu X) dan *In-plane beam profile* (sumbu Y) pada kedalaman 1,5 cm, 5 cm, dan 10 cm.

Prosedur pengukuran eksperimen mengikuti protokol QA standar:

1. Persiapan dan kalibrasi alat.
2. Penempatan fantom dan detektor sesuai protokol.
3. Pengaturan parameter penyinaran (energi, SSD, *field size*, MLC, *jaws*, dan *gantry*).
4. Proses penyinaran dan akusisi data dosis.
5. analisis dan dokumentasi.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PRIMO dengan memodelkan geometri kepala LINAC Varian Clinac CX dan fantom air sesuai kondisi eksperimen. Parameter simulasi yang digunakan adalah:

1. Energi berkas foton 6 MV (*Spektrum Gaussian*).

2. Jumlah partikel (*histories*): 1×10^9 untuk ketidakpastian statistik <2%.

3. Segmen simulasi: S1 (kepala LINAC atas), S2 (Kolimator sekunder), S3 (fantom air + detektor)

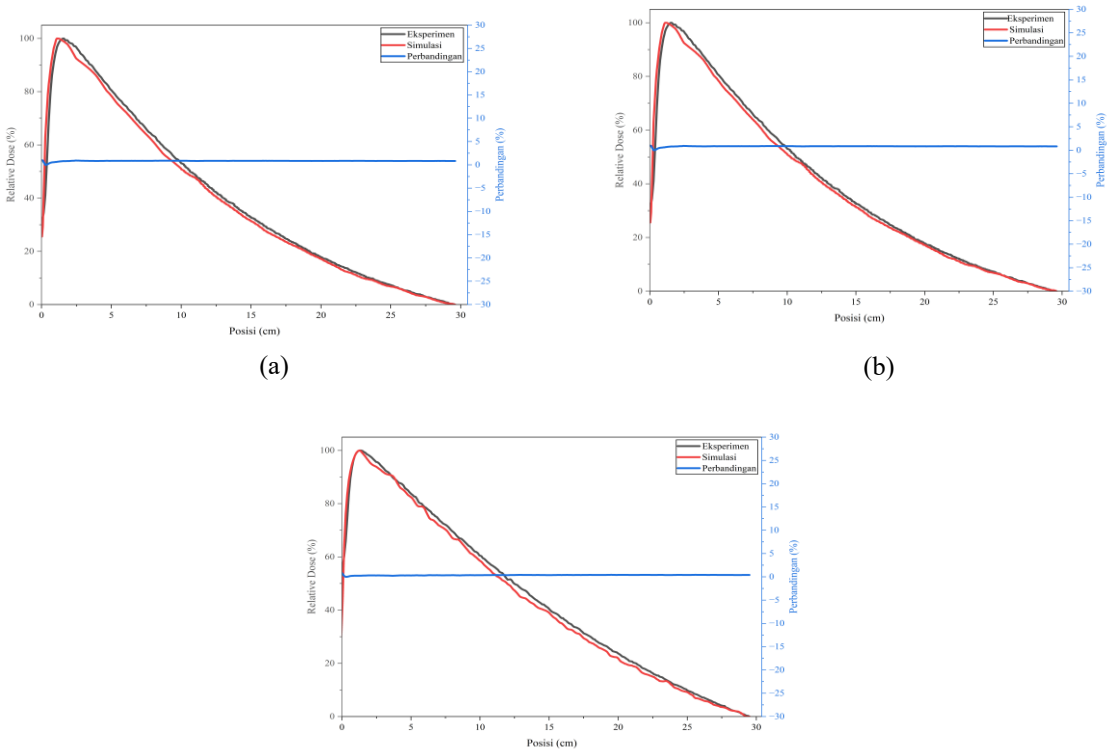
4. Teknik reduksi variansi: *rotational splitting,forcing bremsstrahlung*.

Kesesuaian antara hasil simulasi dan pengukuran dianalisis menggunakan metode indeks gamma dengan kriteria toleransi 2%/2mm. Nilai *Gamma Passing Rate* (GPR) ≥ 95% ditetapkan sebagai batas kelulusan sesuai rekomendasi AAPM TG-142. Kurva PDD dinormalisasikan terhadap dosis maksimum dan dianalisis pada dua wilayah: *build-up dan equilibrium region*.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakteristik *Percentage Depth Dose* (PDD)

Hasil perbandingan eksperimen dan simulasi PRIMO untuk parameter PDD pada tiga ukuran lapangan disajikan pada Gambar 1, sedangkan nilai GPR dirangkum pada Tabel 1. Secara umum, kurva PDD hasil simulasi menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan data eksperimen. Nilai GPR untuk PDD diperoleh sebesar 97,98% (4×4) cm^2, 97,43% (10×10) cm^2 dan 87% (40×40) cm^2. Kesesuaian tinggi pada lapangan kecil dan menengah menunjukkan bahwa parameter pemodelan dalam PRIMO (spektrum energi, geometri head LINAC, dan kondisi simulasi) telah mampu merepresentasikan karakteristik berkas foton secara akurat.



(a) (b)

(c)

Gambar 1 Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi PDD ukuran lapangan (a) (4×4) cm^2, (b) (10×10) cm^2, dan (c) (40×40) cm^2

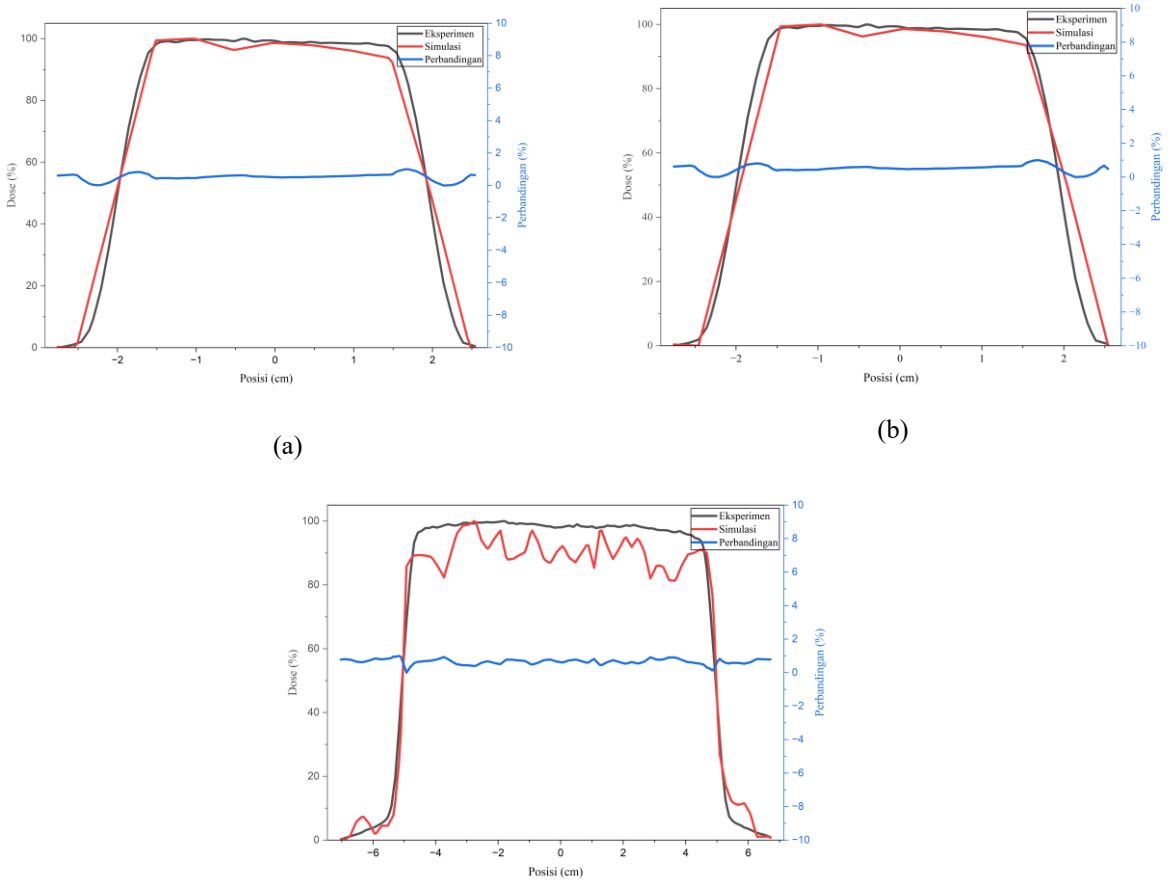
Tabel 1 Hasil analisis gamma untuk parameter PDD

No	Lapangan terbuka rahang cm^2	Indeks gamma rata-rata		Persentase Kompatibilitas (%)
		Build-up region	*Equilibrium region*	
1	4 × 4	1,85	0,48	97,98
2	10 × 10	1,61	0,89	97,43
3	40 × 40	4,29	0,18	87,00

Penurunan GPR pada lapangan 40×40 cm^2 disebabkan oleh meningkatnya kontribusi hamburan lateral dan *backscatter* dari kolimator serta medium. Pada lapangan besar, interaksi sekunder seperti hamburan compton dan kontribusi elektron sekunder menjadi lebih dominan, sehingga distribusi dosis menjadi lebih kompleks dan lebih sulit dimodelkan secara presisi. Fenomena ini sejalan dengan kajian Darafsheh (2021) serta Efendi et al. (2017), yang menyatakan bahwa akurasi simulasi cenderung menurun pada lapangan besar akibat meningkatnya kompleksitas interaksi radiasi dan keterbatasan model dalam merepresentasikan seluruh kontribusi hamburan secara detail. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan konsistensi yang baik dengan teori fisika berkas foton energi megavoltage dan sekaligus memperkuat temuan penelitian sebelumnya mengenai pengaruh ukuran lapangan terhadap karakteristik PDD dan nilai *gamma passing rate*, serta menegaskan keterbatasan simulasi Monte Carlo pada kondisi lapangan besar.

3.2 Karakteristik *Dose Profile*

Hasil *dose profile* pada tiga kedalaman (1,5 cm, 5 cm, dan 10 cm) untuk lapangan (10×10) cm^2 disajikan pada Gambar 2, sedangkan nilai *Gamma Passing Rate* (GPR) dirangkum pada Tabel 2. Secara umum, kesesuaian antara hasil simulasi dan eksperimen paling baik terlihat pada daerah tengah lapangan (*flat region*), sementara deviasi yang lebih besar teramati pada daerah penumbra. Nilai GPR untuk dose profile berada pada rentang 59,50%–70,09%, yang menunjukkan bahwa kesesuaian antara simulasi dan eksperimen belum memenuhi kriteria toleransi QA (≥ 90% untuk 2%/2 mm). Perbedaan ini berkaitan dengan karakteristik daerah penumbra yang memiliki gradien dosis tinggi, sehingga sensitif terhadap perbedaan kecil antara hasil simulasi dan pengukuran



(a) (b)

(c)

Gambar 2 Perbandingan hasil eksperimen dengan simulasi *dose profile* (a) kedalaman 1,5 cm (b) kedalaman 5 cm (c) kedalaman 10 cm

Pada daerah tepi lapangan, penumbra terlihat lebih lebar akibat meningkatnya kontribusi hamburan lateral serta adanya gradien dosis yang tajam. Perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen pada daerah ini masih dapat diamati, yang menunjukkan bahwa evaluasi *dose profile* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap ketidakpastian posisi pengukuran, resolusi spasial detektor, serta *noise* statistik pada simulasi Monte Carlo. Sedikit pergeseran posisi atau perbedaan resolusi pada daerah gradien dosis yang curam dapat menghasilkan deviasi nilai dosis yang relatif lebih besar, meskipun demikian hasil simulasi dan eksperimen tetap menunjukkan pola distribusi dosis lateral yang serupa. Selain itu, kesimetrisan antara sisi kiri dan kanan lapangan tetap terjaga dengan baik, yang mengindikasikan bahwa berkas foton berada dalam kondisi seimbang dan sistem kolimasi berfungsi secara simetris.

Tabel 2 Hasil analisis gamma untuk parameter *dose profile*

No	Kedalaman di dalam fantom (cm)	Indeks gamma rata-rata			Persentase Kompatibilitas (%)
		Inside Field	***Penumbra region***	***Outside Field***	
1	1,5	0,82	1,22	1,42	70,09
2	5	0,75	1,25	1,40	67,39
3	10	0,82	1,52	4,17	59,50

Meskipun nilai GPR *dose profile* berada dibawah batas kelulusan 90%, kesesuaian bentuk kurva serta kesimetrian distibusi dosis antara hasil simulasi dan eksperimen masih menunjukkan kecocokan yang baik. Hal ini mengindikasikan bahwa secara kualitatif simulasi PRIMO tetap mampu menggambarkan karakteristik distribusi dosis lateral berkas foton LINAC, khususnya pada daerah *inside field*. Secara keseluruhan, hasil *dose profile* pada kedalaman 10 cm masih sesuai dengan karakteristik teori distribusi dosis berkas foton. Dengan mempertimbangkan keterbatasan pada daerah penumbra dan sensitivitas tinggi terhadap gradien dosis, simulasi PRIMO cukup representatif sebagai alat bantu evaluasi distribusi dosis lateral dalam proses *Quality Assurance* (QA) LINAC.

3.3 Implikasi Klinis

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi PRIMO layak diadopsi sebagai alat verifikasi independen untuk QA rutin parameter PDD pada LINAC varian Clinac CX, dengan catatan pertimbangan khusus pada analisis lapangan besar (> 20×20) cm^2 dan daerah bergradien tinggi (penumbra). Untuk aplikasi klinis yang memerlukan akurasi tinggi pada daerah penumbra, disarankan menggunakan detektor dengan resolusi spasial lebih tinggi atau mengkombinasikan hasil simulasi dengan pengukuran eksperimen untuk validasi tambahan.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi PRIMO mampu merepresetasikan distribusi dosis PDD dengan tingkat kesesuaian sangat baik, ditunjukkan oleh nilai GPR sebesar 97,98% (4×4) cm^2, 97,43% (10×10) cm^2 dan 87% (40×40) cm^2. Penurunan GPR pada lapangan besar disebabkan oleh meningkatnya kontribusi hamburan lateral. Pada evaluasi *dose profile,* kesesuaian simulasi dan eksperimen paling baik pada daerah tengah lapangan, sedangkan deviasi lebih besar terjadi pada daerah penumbra dan kedalaman dangkal akibat gradien dosis yang curam serta keterbatasan resolusi detektor. Secara keseluruhan, simulasi PRIMO telah memenuhi kriteria toleransi QA ($\gamma \leq 1$, kriteria 2%/2 mm) untuk parameter PDD dan layak sebagai alat verifikasi independen untuk QA rutin berkas foton LINAC Clinac CX.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Altuwayrish, A., Ghorbani, M., Bakhshandeh, M., Roozmand, Z., HoseiniGhahfarokhi, M., 2022, Comparison of PRIMO Monte Carlo code and Eclipse treatment planning system in calculation of dosimetric parameters in brain cancer radiotherapy, *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, Vol. 27, Hal. 863–874, DOI: 10.5603/rpOr.a2022.0091.

American Cancer Society, 2024, 2024-Cancer-Facts-and-Figures-Acs, *Cancer Facts and Figures*.

Brualla, L., Rodriquez, M., Sempau, J., 2020, *PRIMO User Manual*, Germany.

Daniel A. Low, a) William B. Harms, Sasa Mutic, and J.A.P., 1998, *Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy: Supplement to ICRU Report 50*, ICRU Press, Besthesda, Maryland, USA.

Darafsheh, A., 2021. Radiation therapy dosimetry: A practical handbook.CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003037248

Efendi, M.A., Funsian, A., Chittrakarn, T., Bhongsuwan, T., 2017, *Monte carlo simulation of 6 MV flattening filter free photon beam of truebeam STx LINAC* at songklanagarind hospital, *Sains Malaysiana*, Vol. 46, Hal. 1407– 1411, DOI: 10.17576/jsm-2017-4609-08.

International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). (1993). Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy .

Klein, E.E., Hanley, J., Bayouth, J., Yin, F.F., Simon, W., Dresser, S., Serago, C., Aguirre, F., Ma, L., Arjomandy, B., Liu, C., Sandin, C., Holmes, T., 2009, Task group 142 report: Quality assurance of medical acceleratorsa, *Medical Physics*, Vol. 36, Hal. 4197–4212, DOI: 10.1118/1.3190392.

Mayles, P., Nahum, A. E., & Rosenwald, J.-C., 2007. Handbook of radiotherapy physics: Theory and practice. CRC Press.

Podgorsak, E.B., n.d., Radiation Oncology Physics : *A Handbook for Teachers and Students*.

Rodriguez, M., Sempau, J., Fogliata, A., Cozzi, L., Sauerwein, W., Brualla, L., 2015, A geometrical model for the Monte Carlo simulation of the TrueBeam linac, *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 60, Hal. N219–N229, DOI: 10.1088/0031-9155/60/11/N219.

Sarin, B., Bindhu, B., Saju, B., Nair, R. K., 2020, *Validation of PRIMO Monte Carlo model of Clinac iX 6 MV photon beam*, Journal of Medical Physics, Vol. 45(1), Hal. 24–35, DOI: 10.4103/jmp.JMP_75_19

Sempau, B.R., 2015, User ’ s Manual.

Susworo, R. (2007). Radioterapi: Dasar-dasar radioterapi, tata laksana radioterapi penyakit kanker (Edisi ke-5). UI-Press.

Stephen Morris, Tom Roques, shahreen Ahmad, S.L., 2023, *No Title*, Edisi fifth Edit, 2 Oktober 2023, Boca Raton, Florida, USA.

Thomadsen, B. R., Rivard, M. J., & Butler, W. M., 2015. Brachytherapy physics (2nd ed.). Medical Physics Publishing

Williams, J. R., & Thwaites, D. I., 1993. Radiotherapy physics in practice. Oxford University Press.