



Tinjauan Teknik Radioterapi 3D-CRT, IMRT, LINAC, dan Booster Elektron dalam Optimasi Dosis dan Perlindungan Organ Risiko

Fathiyah Nisaaul Haq^{1*}, Tasya Adinda Putri², Yasmin Aula Febriana Iriandita³, I Gde Eka Dirgayusa⁴, Nurul Maulidiyah⁵, Rafli Filano⁶

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

*E-mail fathiyah.123430109@student.itera.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i01.1768>

Accepted: 17 Desember 2025 Approved: 21 April 2026 Published: 2 Mei 2026

ABSTRAK

Radioterapi merupakan salah satu terapi kanker yang terus mengalami perkembangan hingga kini seiring dengan kemajuan teknologi penyinaran, perencanaan dosis, dan dosimetri. Peran dari fisika medis turut berperan dalam mengefektifkan radioterapi dalam mencapai dosis cukup tinggi pada PTV namun dengan paparan minimal pada OAR. Teknik radioterapi mencakup 3D-CRT, IMRT, LINAC, dan *Booster Electron* yang dimana keempatnya digunakan untuk mencapai distribusi obat yang presisi dan aman pada PTV. Adapun metode penelitian yang digunakan pada artikel ini menggunakan *literature review* untuk mengkaji teknik radioterapi modern menggunakan artikel-artikel yang memenuhi kriteria dan kemudian digunakan sebagai sumber utama dalam menyusun artikel *review* ini. Dari sembilan artikel yang dikaji dan disajikan dalam bentuk tabular, hasil menunjukkan adanya pola yang konsisten mengenai radioterapi modern yang mampu memberikan dosis yang lebih homogen dan konformal dibandingkan dengan teknik konvensional. Sebagian besar terapi memberikan perlindungan terhadap organ yang berisiko dan menunjukkan respon klinis yang berbeda-beda. Ditemukan juga pentingnya kontinuitas jadwal fraksionasi karena terapi yang terinterupsi berpengaruh secara signifikan terhadap penurunan survival pasien. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa optimalisasi teknik radioterapi bukan hanya meningkatkan kualitas dosimetri, tetapi juga memperbaiki luaran klinis. Namun, karena adanya keterbatasan pada penelitian ini, masih dibutuhkannya penelitian lanjutan melalui riset yang lebih mendalam dan terstandar.

Kata kunci: 3D-CRT, Dosimetri, IMRT, LINAC, Radioterapi.

ABSTRACT

Radiotherapy is a cancer treatment that continues to advance with developments in radiation technology, dose planning, and dosimetry. Medical physics plays an essential role in ensuring that radiotherapy delivers high doses to the PTV while minimizing exposure to OAR. Modern techniques such as 3D-CRT, IMRT, LINAC, and Electron Booster are widely used to achieve precise and safe dose distribution. This article uses a literature review method by examining selected studies that meet predetermined criteria as the main sources of analysis. From the nine reviewed articles, presented in tabular form, the findings show a consistent pattern: modern radiotherapy techniques provide more homogeneous and conformal dose distributions compared to conventional approaches. These techniques also offer better protection for organs at risk and demonstrate varying clinical responses depending on the cancer type and technique used. Several studies highlight the importance of maintaining continuity in the fractionation schedule, as interruptions were shown to significantly reduce patient survival rates. Overall, the results indicate that optimizing radiotherapy techniques not only enhances dosimetric quality but may also improve clinical outcomes. However, due to limitations

Fathiyah Nisaaul Haq, Tasya Adinda Putri, Yasmin Aula, I Gde Eka Dirgayusa, Nurul Maulidiyah, Rafli Filano/ JPFS 9 (2) (2026) 103-112
such as small sample sizes and minimal long-term clinical evaluation, further research with stronger study designs is still required.

Keyword: 3D-CRT, *Dosimetry*, IMRT, LINAC, *Radiotherapy*.

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan salah satu modalitas utama dalam terapi kanker yang terus mengalami perkembangan signifikan seiring kemajuan teknologi pencitraan medis, perangkat penyinaran, serta sistem perencanaan dosis. Dalam praktik klinis modern, keberhasilan radioterapi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan memberikan dosis tinggi secara tepat pada target tumor, tetapi juga oleh kemampuan meminimalkan paparan radiasi pada jaringan sehat di sekitarnya. Oleh karena itu, konsep *Planning Target Volume (PTV)*, yaitu volume target yang mencakup tumor beserta margin keamanan, dan *Organ at Risk (OAR)*, yaitu organ sehat yang sensitif terhadap radiasi dan harus dilindungi, menjadi parameter utama dalam evaluasi dosimetri. Seiring meningkatnya kebutuhan akan terapi yang lebih presisi, teknik-teknik seperti *Three-Dimensional Conformal Radiotherapy (3D-CRT)*, *Intensity-Modulated Radiotherapy (IMRT)*, penyinaran menggunakan *Linear Accelerator (LINAC)*, serta aplikasi *booster* elektron menjadi pilihan utama dalam berbagai jenis kanker termasuk serviks, payudara, dan nasofaring.

Secara global, perkembangan teknik radioterapi telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam kualitas distribusi dosis. Teknik IMRT, yang telah diadopsi secara luas di berbagai negara, terbukti mampu meningkatkan konformitas dosis terhadap PTV sekaligus menurunkan paparan pada OAR melalui modulasi intensitas berkas radiasi. Selain itu, berbagai studi internasional menunjukkan bahwa IMRT memberikan keuntungan klinis berupa penurunan toksisitas jaringan normal serta peningkatan kualitas hidup pasien dibandingkan teknik konvensional. Perkembangan lain seperti *Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)* dan *tomotherapy* juga dilaporkan mampu memberikan distribusi dosis yang lebih optimal dan efisien dalam berbagai kasus kanker, dengan peningkatan homogenitas dosis serta perlindungan OAR yang lebih baik. Di sisi lain, teknik 3D-CRT masih banyak digunakan, terutama di negara berkembang, karena kemudahan implementasi dan efektivitasnya dalam memberikan cakupan dosis yang cukup baik pada PTV. Penggunaan LINAC sebagai perangkat utama dalam radioterapi modern memungkinkan penerapan berbagai teknik lanjutan, baik berbasis foton maupun elektron, termasuk penggunaan *booster* elektron untuk lesi superfisial. Kombinasi teknologi ini memungkinkan optimalisasi terapi yang lebih presisi dan terkontrol.

Dalam praktik klinis, keberhasilan radioterapi sangat bergantung pada akurasi perencanaan yang dihasilkan oleh *Treatment Planning System (TPS)*. Parameter evaluasi seperti *Conformity Index (CI)*, *Homogeneity Index (HI)*, dan *Dose-Volume Histogram (DVH)* digunakan untuk memastikan bahwa distribusi dosis sesuai dengan standar internasional seperti ICRU dan RTOG (Elvira et al., 2021; Iqbal et al., 2023; Ambarsari et al., 2024). Studi pada kanker nasofaring menunjukkan bahwa variasi teknik IMRT, seperti penggunaan lima hingga tujuh lapangan, mampu menghasilkan distribusi dosis yang lebih konformal dan homogen, terutama pada teknik manual 7-lapangan yang terbukti memberikan nilai CI dan HI terbaik (Elvira et al., 2021). Pada kasus kanker payudara, penggunaan IMRT maupun 3D-CRT juga melaporkan kemampuan yang baik dalam menjaga dosis organ vital—termasuk paru-paru, jantung, dan *spinal cord*—dalam batas toleransi klinis (Wulandari et al., 2022; Ambarsari et al., 2024). Selain itu, *booster* elektron dilaporkan memberikan cakupan PTV yang konsisten dengan paparan OAR yang sangat rendah, sehingga menjadi opsi efektif untuk penyinaran tambahan pasca terapi foton (Mirfauddin et al., 2023).

Meskipun berbagai teknik tersebut menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kualitas pengobatan, masih terdapat sejumlah tantangan signifikan dalam literatur. Sebagian besar penelitian yang tersedia merupakan studi kasus tunggal atau menggunakan jumlah sampel yang sangat kecil, sehingga temuan sulit digeneralisasi secara luas (Tanudjaja et al., 2022; Wulandari et al., 2022; Mirfauddin et al., 2023; Iqbal et al., 2023). Banyak penelitian lebih fokus pada aspek teknis tanpa mengevaluasi respons klinis jangka panjang atau tingkat toksisitas radiasi secara komprehensif, padahal efek biologis radiasi menjadi salah satu komponen penting dalam penentuan keberhasilan terapi

(Tanudjaja et al., 2022). Selain itu, meskipun parameter dosimetri seperti CI, HI, dan DVH telah memenuhi standar, beberapa studi menunjukkan bahwa masih terdapat potensi deviasi dosis aktual pada PTV maupun OAR apabila proses verifikasi tidak dilakukan secara menyeluruh, terutama akibat keterbatasan metode *quality assurance* konvensional seperti *gamma passing rate* yang tidak selalu mencerminkan distribusi dosis klinis secara akurat (Yi et al., 2020). Hal ini juga diperkuat oleh studi berbasis simulasi Monte Carlo yang menunjukkan bahwa akurasi perhitungan dosis sangat bergantung pada metode yang digunakan, sehingga perbedaan pendekatan perencanaan dapat menghasilkan variasi distribusi dosis yang signifikan (Shende et al., 2023)

Di sisi lain, studi dengan jumlah sampel besar menunjukkan adanya masalah operasional yang cukup krusial dalam pelayanan radioterapi, seperti gangguan mesin, penundaan jadwal, dan ketidakhadiran pasien, yang terbukti menurunkan tingkat kelangsungan hidup dan meningkatkan risiko kekambuhan kanker (Suryanegara et al., 2023). Hal ini menegaskan bahwa kualitas hasil radioterapi tidak hanya bergantung pada teknik penyinaran dan akurasi dosimetri, tetapi juga pada stabilitas operasional fasilitas radioterapi, suatu aspek yang masih relatif jarang dibahas dalam literatur teknis.

Kesenjangan lainnya muncul dari terbatasnya penelitian yang membandingkan secara langsung performa teknik 3D-CRT, IMRT, LINAC, dan *booster* elektron pada kondisi klinis yang serupa. Sebagian besar penelitian masih menggunakan pendekatan deskriptif tanpa didukung analisis statistik komparatif yang memadai, sehingga penilaian terhadap keunggulan relatif masing-masing teknik belum dapat ditentukan secara objektif dan masih memerlukan validasi lebih lanjut (Harun et al., 2022; Winarno et al., 2021). Selain itu, variasi dalam prosedur simulasi CT, algoritma perhitungan dosis, konfigurasi *multileaf collimator* (MLC), serta strategi verifikasi geometrik turut berkontribusi terhadap heterogenitas hasil evaluasi dosimetri. Perbedaan metodologi ini tidak hanya mempengaruhi nilai parameter seperti CI, HI, dan DVH, tetapi juga menyulitkan perbandingan antar studi secara langsung. Kurangnya standarisasi serta pelaporan metodologi yang rinci menjadi faktor pembatas utama dalam upaya sintesis literatur yang komprehensif dan reproduisibel.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, tinjauan ini disusun untuk mengintegrasikan temuan dari sembilan penelitian terkait penggunaan teknik 3D-CRT, IMRT, LINAC, dan *booster* elektron dalam perencanaan dan evaluasi dosimetri radioterapi. Tinjauan ini bertujuan untuk: (1) merangkum hasil evaluasi dosimetri dari masing-masing teknik berdasarkan parameter *Conformity Index* (CI), *Homogeneity Index* (HI), dan *Dose-Volume Histogram* (DVH); (2) membandingkan karakteristik distribusi dosis terhadap *Planning Target Volume* (PTV) dan *Organ at Risk* (OAR); (3) mengidentifikasi tantangan klinis dan operasional dalam penerapan teknik radioterapi di fasilitas layanan kesehatan; serta (4) mengevaluasi peluang pengembangan dalam penelitian dan praktik fisika medis. Dengan demikian, hasil tinjauan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan terstruktur bagi klinisi, fisikawan medis, serta pengambil kebijakan dalam meningkatkan kualitas perencanaan hingga implementasi radioterapi, khususnya di Indonesia.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah *Systematic-Qualitative Literature Review*. Pendekatan ini dipilih untuk mengkaji secara komprehensif perkembangan teknik radioterapi modern, meliputi *Three-Dimensional Conformal Radiotherapy* (3D-CRT), *Intensity-Modulated Radiotherapy* (IMRT), penggunaan *Linear Accelerator* (LINAC), serta aplikasi *booster* elektron. Fokus utama review ini adalah menganalisis efektivitas teknik-teknik tersebut dalam mengoptimalkan distribusi dosis ke *Planning Target Volume* (PTV) dan meminimalkan paparan pada *Organ at Risk* (OAR) berdasarkan hasil penelitian yang telah dipublikasikan.

Sumber Data dan Subjek

Proses pencarian literatur dilakukan secara komprehensif pada beberapa basis data ilmiah internasional, yaitu PubMed, Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci spesifik: “*radiotherapy optimization*,” “*IMRT dosimetry*,” “*3D-CRT planning*,” “*LINAC radiotherapy*,” dan “*electron beam booster*”. Subjek dalam penelitian ini adalah artikel ilmiah yang relevan dengan topik kajian. Melalui proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, diperoleh sebanyak sembilan (9) artikel yang digunakan sebagai sampel penelitian. Jumlah artikel ini dipilih karena telah memenuhi kriteria relevansi, kelengkapan data dosimetri, serta keterwakilan variasi teknik radioterapi yang dikaji, sehingga dianggap cukup untuk memberikan gambaran komparatif yang mendalam terhadap efektivitas masing-masing teknik.

Kriteria inklusi yang diterapkan meliputi: (1) artikel yang dipublikasikan pada periode 2021–2024, (2) membahas salah satu atau lebih teknik radioterapi yang menjadi fokus kajian, (3) menyajikan data teknis mengenai perencanaan dosis atau parameter dosimetri kuantitatif seperti *Conformity Index* (CI), *Homogeneity Index* (HI), dan *Dose-Volume Histogram* (DVH), atau hasil klinis yang didukung data teknis, serta (4) menggunakan bahasa Indonesia atau Inggris. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut, seperti opini atau studi tanpa data dosimetri yang eksplisit, dikeluarkan dari proses analisis.

Prosedur Seleksi Literatur

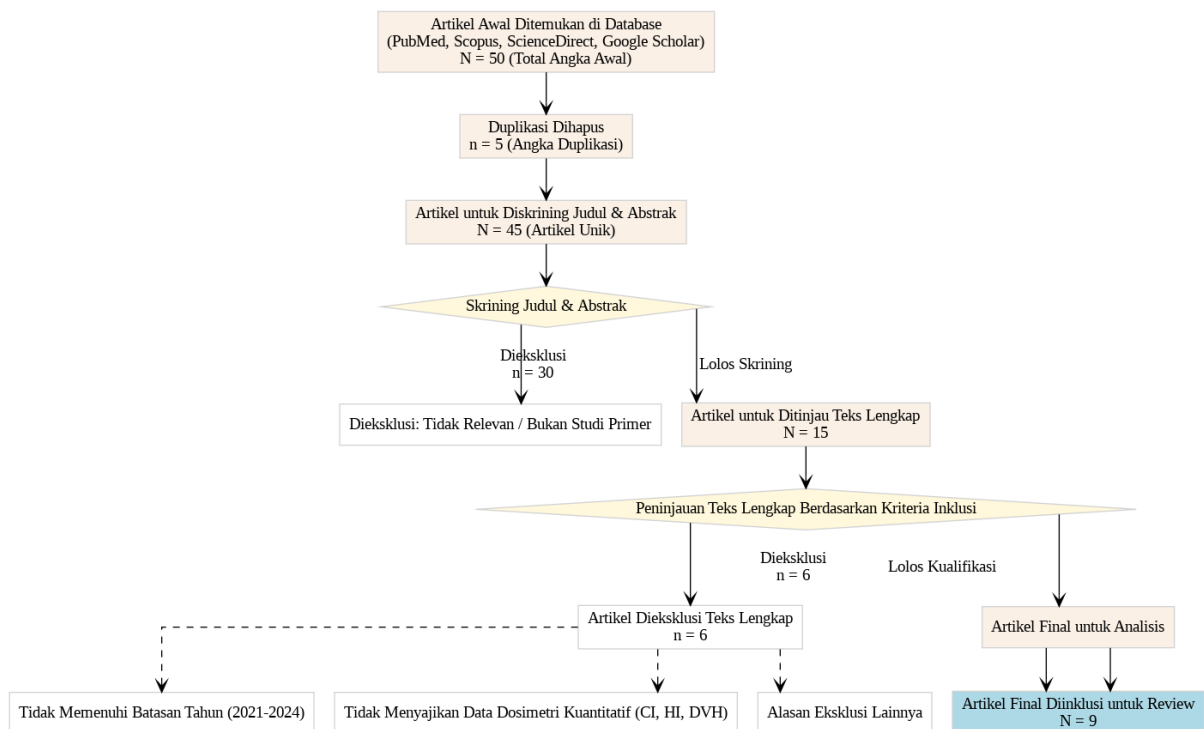
Proses seleksi artikel dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi, skrining, dan inklusi. Tahap identifikasi dilakukan dengan mengumpulkan seluruh artikel yang diperoleh dari hasil pencarian pada database. Selanjutnya, tahap skrining dilakukan dengan menyeleksi judul dan abstrak untuk mengeliminasi artikel yang tidak relevan. Tahap akhir adalah penentuan kelayakan (*eligibility*), yaitu pemilihan artikel berdasarkan kesesuaian dengan kriteria inklusi dan eksklusi. Seluruh proses ini divisualisasikan dalam bentuk diagram alir untuk meningkatkan transparansi dan replikabilitas penelitian.

Analisis Data

Setiap artikel yang terpilih dianalisis melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Ekstraksi data, dengan mengidentifikasi informasi penting seperti jenis teknik radioterapi, parameter dosimetri (CI, HI, DVH), metode perencanaan, serta strategi perlindungan OAR.
2. Klasifikasi data, yaitu pengelompokan hasil penelitian berdasarkan jenis teknik (3D-CRT, IMRT, LINAC, dan *booster* elektron) untuk mempermudah proses perbandingan.
3. Analisis deskriptif, dilakukan dengan mendeskripsikan karakteristik dan hasil utama dari masing-masing studi.
4. Analisis komparatif kualitatif, yaitu membandingkan nilai parameter dosimetri antar teknik, seperti perbandingan CI dan HI untuk menilai tingkat konformitas dan homogenitas dosis pada PTV, serta analisis DVH untuk mengevaluasi tingkat perlindungan terhadap OAR.

Analisis dalam penelitian ini tidak menggunakan pendekatan statistik inferensial, melainkan berfokus pada sintesis kualitatif berbasis perbandingan hasil antar studi. Selain itu, keterbatasan dari masing-masing penelitian, seperti ukuran sampel yang kecil atau tidak adanya evaluasi jangka panjang, turut dianalisis untuk memberikan konteks terhadap kekuatan dan kelemahan temuan yang diperoleh.



Gambar 1. Diagram Alir Pencarian Artikel

HASIL

Tabel 1. *Review* Jurnal

No	Peneliti (Tahun)	Judul	Data	Metode	Hasil	Kekurangan
1	Herlinda Mahdania Harun et al. (2022)	Evaluasi Pengobatan Radioterapi Pada Pasien Kanker	60 responden pasien kanker, Maret–Mei 2021; mayoritas usia 46–52 th; 71,4% perempuan.	Deskriptif kuantitatif; wawancara & rekam medis; karakteristik, jenis kanker, lama terapi.	Efek samping: lemas, nyeri area radiasi; sebagian rawat inap; durasi 2–3 bulan.	Keterbatasan COVID-19; tidak ada data stadium dan dosis; hanya deskriptif.
2	Winarno et al. (2021)	Radioterapi Kanker <i>Cervix</i> Dengan LINAC	Data observasional: posisi pasien, energi, waktu, dosis, fraksi, field, gantry, MLC.	Deskriptif observasional ; teknik 3D conformal; dosis 20 Gy/10 fraksi.	LINAC tepat sasaran; TPS hasilkan distribusi optimal; proteksi organ sehat baik.	Tidak ada jumlah pasien; tidak ada data statistik atau perbandingan metode.
3	Beatrice Tanudjaja et al. (2022)	Pengaruh Radioterapi terhadap Rinitis Alergi	Satu pasien laki-laki 19 th; data sebelum-sesudah terapi; tes alergi.	Laporan kasus & kajian literatur berbasis bukti.	Gejala mereda saat terapi, muncul lebih kuat 3 bulan pasca; dipengaruhi modulasi imun.	Kasus tunggal; tidak ada data kuantitatif detail.
4	Rahmah Elvira et al. (2021)	Analisis Perencanaan RT Nasofaring Teknik IMRT	5 pasien laki-laki stadium III; dosis 70 Gy (35×2 Gy); variasi IMRT M5/O5/M7/O7.	Eksperimena l kuantitatif; CI, HI, OAR; uji Wilcoxon; DVH.	IMRT M7 terbaik; semua memenuhi standar ICRU; dua pasien M5 melebihi OAR.	Sampel kecil; hanya laki-laki; tidak ada evaluasi klinis jangka panjang.

5	Ira Wulandari et al. (2022)	Penatalaksanaan RT Payudara Teknik IMRT	Kasus 1 pasien 47 th stadium IIa; 25 fraksi; Linac Elekta Versa HD.	Studi kasus; observasi, dokumentasi, wawancara; TPS Monaco; Step and Shoot.	IMRT homogen & protektif; OAR dalam batas aman; verifikasi berkala efektif.	Kasus tunggal; tidak ada evaluasi klinis jangka panjang.
6	Mirfauddin et al. (2023)	RT <i>Booster</i> Elektron Kanker Payudara	1 pasien 46 th Ca mammae dextra; booster elektron 20 Gy/8 fraksi.	Studi kasus; observasi, wawancara; TPS; blok cerrobend; verifikasi.	Distribusi dosis homogen; OAR rendah; blok efektif; proteksi organ vital baik.	Kasus tunggal; tidak menilai <i>outcome</i> klinis jangka panjang.
7	Ambarsari et al. (2024)	Evaluasi Dosimetri 3D-CRT Payudara	Data DVH, CT, PTV, OAR dari RSPAD Gatot Soebroto.	Eksperimental; evaluasi CI, HI, DVH; standar IAEA/ICRU.	PTV homogen & konformal; OAR aman; 3D-CRT efektif & aman.	Sampel terbatas; tidak bahas <i>outcome</i> klinis; tidak dibandingkan IMRT/VMA T.
8	Suryanegara et al. (2023)	<i>Facing Problems in Radiotherapy for Breast Cancer</i>	212 pasien (2016–2019); rekam medis; gangguan terapi; survival.	Retrospektif; analisis hubungan interupsi & survival.	44% mengalami interupsi; survival lebih rendah; interupsi >7 hari signifikan.	Rekam medis tidak lengkap; tanpa detail dosis; satu rumah sakit.
9	Iqbal S. et al. (2023)	Analisis Perencanaan IMRT Kanker Serviks	1 pasien stadium IV; DVH, PTV, OAR dari TPS.	Eksperimen; contouring; IMRT; evaluasi CI & HI.	CI baik; HI merata; OAR aman; DVH menunjukkan dosis tepat sasaran.	Sampel 1; tidak ada perbandingan; tidak menilai respons klinis.

Tabel 1 menyajikan ringkasan sembilan artikel yang dianalisis dalam penelitian ini, yang mencakup variasi teknik radioterapi, metode penelitian, hasil utama, serta keterbatasan masing-masing studi. Secara umum, studi yang ditinjau menunjukkan bahwa teknik radioterapi modern seperti IMRT, 3D-CRT, dan *booster* elektron mampu menghasilkan distribusi dosis yang optimal pada *Planning Target Volume* (PTV) serta menjaga paparan pada *Organ at Risk* (OAR) tetap dalam batas toleransi klinis.

Berdasarkan metode penelitian, sebagian besar studi menggunakan pendekatan deskriptif dan studi kasus, dengan jumlah sampel yang relatif kecil, bahkan beberapa hanya melibatkan satu pasien (Tanudjaja et al., 2022; Wulandari et al., 2022; Mirfauddin et al., 2023; Iqbal et al., 2023). Hanya beberapa penelitian yang menggunakan desain eksperimental atau retrospektif dengan jumlah sampel lebih besar, seperti studi oleh Suryanegara et al. (2023) yang melibatkan 212 pasien. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum, penelitian di bidang ini masih didominasi oleh studi dengan tingkat generalisasi yang terbatas.

Dari segi hasil dosimetri, teknik IMRT dilaporkan memiliki keunggulan dalam menghasilkan distribusi dosis yang lebih konformal dan homogen dibandingkan teknik lainnya, sebagaimana ditunjukkan pada studi Elvira et al. (2021) dengan teknik IMRT tujuh lapangan (M7) yang memberikan nilai *Conformity Index* (CI) dan *Homogeneity Index* (HI) terbaik. Teknik 3D-CRT juga menunjukkan performa yang baik dalam menjaga distribusi dosis yang aman terhadap OAR, meskipun dengan tingkat konformitas yang relatif lebih rendah dibandingkan IMRT (Ambarsari et al., 2024). Selain itu, penggunaan *booster* elektron terbukti efektif dalam memberikan dosis tambahan dengan paparan minimal terhadap jaringan sehat di sekitarnya (Mirfauddin et al., 2023).

Namun demikian, beberapa studi juga menunjukkan adanya variasi hasil yang dipengaruhi oleh faktor teknis seperti konfigurasi *multileaf collimator* (MLC), teknik perencanaan, serta akurasi verifikasi dosis. Selain itu, meskipun parameter dosimetri seperti CI, HI, dan *Dose-Volume Histogram* (DVH) umumnya menunjukkan hasil yang memenuhi standar, sebagian besar penelitian tidak mengevaluasi hubungan langsung antara parameter tersebut dengan luaran klinis jangka panjang, seperti tingkat *survival* atau toksisitas radiasi.

Dari aspek operasional, studi oleh Suryanegara et al. (2023) menunjukkan bahwa faktor non-teknis seperti interupsi terapi memiliki dampak signifikan terhadap hasil pengobatan, di mana pasien dengan jeda terapi lebih dari tujuh hari menunjukkan tingkat *survival* yang lebih rendah. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan radioterapi tidak hanya dipengaruhi oleh kualitas perencanaan dan teknik penyinaran, tetapi juga oleh faktor manajemen layanan dan kepatuhan pasien terhadap jadwal terapi.

Secara keseluruhan, hasil *review* ini menunjukkan bahwa meskipun teknik radioterapi modern telah mampu meningkatkan kualitas distribusi dosis, masih terdapat keterbatasan dalam desain penelitian, ukuran sampel, serta kurangnya evaluasi klinis jangka panjang yang perlu diperhatikan dalam pengembangan penelitian selanjutnya.

PEMBAHASAN

Temuan utama dari rangkuman berbagai penelitian menunjukkan bahwa teknik radioterapi modern, khususnya *Intensity-Modulated Radiotherapy* (IMRT), *Three-Dimensional Conformal Radiotherapy* (3D-CRT), dan *booster* elektron, memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi distribusi dosis dan perlindungan jaringan sehat. Peningkatan ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berdampak langsung terhadap efektivitas terapi dan potensi luaran klinis pasien. IMRT unggul dalam presisi distribusi dosis, 3D-CRT menawarkan stabilitas dan kemudahan implementasi, sedangkan *booster* elektron berperan dalam optimalisasi dosis tambahan secara lokal. Kombinasi karakteristik ini menunjukkan bahwa pemilihan teknik radioterapi harus mempertimbangkan keseimbangan antara kompleksitas kasus, ketersediaan teknologi, dan tujuan klinis terapi.

1. Superioritas Dosimetri dan Mekanisme Fisik

Keunggulan IMRT dalam menghasilkan distribusi dosis yang konformal dan homogen tidak terlepas dari mekanisme fisik yang mendasarinya, yaitu kemampuan modulasi intensitas berkas radiasi melalui pengaturan *multileaf collimator* (MLC). Dengan teknik ini, dosis dapat “dibentuk” mengikuti kontur target tumor secara tiga dimensi, sehingga mengurangi penyebaran dosis ke jaringan sehat di sekitarnya. Hal ini tercermin pada nilai *Conformity Index* (CI) dan *Homogeneity Index* (HI) yang lebih optimal pada berbagai studi, termasuk pada teknik IMRT tujuh lapangan yang menunjukkan performa terbaik (Elvira et al., 2021).

Sebaliknya, 3D-CRT bekerja dengan pendekatan geometris berbasis beberapa arah berkas tetap (*fixed beam*), sehingga meskipun mampu memberikan cakupan dosis yang cukup baik pada *Planning Target Volume* (PTV), fleksibilitasnya dalam menghindari *Organ at Risk* (OAR) lebih terbatas

dibandingkan IMRT. Namun demikian, keunggulan 3D-CRT terletak pada kestabilan perencanaan, waktu perhitungan yang lebih singkat, serta kebutuhan sumber daya yang lebih rendah, sehingga tetap relevan dalam praktik klinis, terutama di fasilitas dengan keterbatasan teknologi.

Sementara itu, *booster* elektron memiliki karakteristik fisik berupa penetrasi dangkal dengan *dose fall-off* yang cepat, yang memungkinkan pemberian dosis tinggi pada target superfisial tanpa meningkatkan paparan pada jaringan yang lebih dalam. Hal ini menjadikan teknik ini sangat efektif sebagai terapi tambahan (*boost*) setelah penyinaran utama menggunakan foton. Dengan demikian, setiap teknik memiliki keunggulan spesifik yang saling melengkapi dalam strategi terapi radioterapi modern.

2. Efisiensi Perlindungan OAR dan Dampak Biologis

Perlindungan terhadap OAR merupakan salah satu indikator utama keberhasilan radioterapi, karena berkaitan langsung dengan risiko toksisitas akut maupun kronis. Teknik IMRT menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menurunkan dosis pada organ vital seperti paru-paru, jantung, dan sumsum tulang belakang, yang secara klinis dapat mengurangi kejadian komplikasi seperti pneumonitis radiasi, kardiotoxikitas, maupun gangguan neurologis.

Secara biologis, penurunan dosis pada OAR akan mengurangi kerusakan sel normal dan respon inflamasi yang berlebihan, sehingga berkontribusi pada perbaikan kualitas hidup pasien pasca terapi. Namun, penting untuk dicatat bahwa distribusi dosis yang optimal secara dosimetri tidak selalu secara langsung berbanding lurus dengan luaran klinis, karena respons terapi juga dipengaruhi oleh faktor biologis individu, seperti radiosensitivitas jaringan, kondisi imunologis, serta stadium penyakit.

Temuan Tanudjaja et al. (2022) yang menunjukkan adanya reaksi imun berupa rinitis alergi pasca radioterapi mengindikasikan bahwa efek radiasi tidak hanya terbatas pada area target, tetapi juga dapat memicu respons sistemik. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi keberhasilan radioterapi perlu mempertimbangkan aspek biologis secara lebih komprehensif, tidak hanya terbatas pada parameter dosimetri.

3. Relevansi Klinis dan Pengambilan Keputusan

Dari perspektif klinis, hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan teknik radioterapi. Pada kasus dengan kompleksitas tinggi—misalnya tumor yang berdekatan dengan organ vital—IMRT menjadi pilihan utama karena kemampuannya dalam memaksimalkan dosis pada target sekaligus meminimalkan risiko pada OAR. Sebaliknya, pada kasus dengan kompleksitas lebih rendah atau pada fasilitas dengan keterbatasan teknologi, 3D-CRT dapat digunakan sebagai alternatif yang efisien dengan hasil yang masih dapat diterima secara klinis.

Penggunaan *booster* elektron juga memiliki implikasi praktis, terutama dalam meningkatkan kontrol lokal tumor tanpa meningkatkan toksisitas sistemik. Selain itu, faktor operasional seperti stabilitas mesin *Linear Accelerator* (LINAC), ketepatan jadwal fraksionasi, serta kepatuhan pasien menjadi komponen penting dalam menentukan keberhasilan terapi secara keseluruhan.

Temuan mengenai dampak interupsi terapi terhadap penurunan *survival* menegaskan bahwa aspek manajemen layanan memiliki peran yang sama pentingnya dengan aspek teknis. Keterlambatan terapi dapat menyebabkan repopulasi sel tumor, yang pada akhirnya menurunkan efektivitas radiasi. Oleh karena itu, optimalisasi radioterapi harus mencakup integrasi antara teknologi, sumber daya manusia, dan sistem pelayanan kesehatan.

4. Generalisasi Temuan dan Arah Pengembangan

Meskipun hasil *review* menunjukkan konsistensi dalam keunggulan teknik radioterapi modern, generalisasi temuan masih terbatas oleh desain penelitian yang didominasi studi kasus dan sampel kecil. Hal ini mengindikasikan perlunya penelitian lanjutan dengan desain yang lebih kuat, seperti studi kohort atau uji klinis, untuk memvalidasi hubungan antara parameter dosimetri dan luaran klinis secara lebih komprehensif.

Namun demikian, temuan ini tetap memiliki relevansi yang tinggi dalam konteks pengembangan layanan radioterapi, khususnya di negara berkembang. Implementasi teknik seperti IMRT perlu diimbangi dengan peningkatan kapasitas fasilitas, pelatihan tenaga medis, serta standarisasi prosedur untuk memastikan kualitas terapi yang optimal.

Dalam konteks kebijakan kesehatan, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait investasi teknologi radioterapi, distribusi fasilitas kesehatan, serta pengembangan protokol terapi yang lebih terstandar. Dengan demikian, integrasi antara kemajuan teknologi dan kebijakan kesehatan yang tepat diharapkan dapat meningkatkan akses dan kualitas layanan radioterapi secara menyeluruh.

KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa teknik radioterapi modern, khususnya *Intensity-Modulated Radiotherapy* (IMRT), *Three-Dimensional Conformal Radiotherapy* (3D-CRT), dan *booster* elektron, berperan penting dalam meningkatkan efisiensi distribusi dosis melalui peningkatan konformitas dan homogenitas pada *Planning Target Volume* (PTV), sekaligus meminimalkan paparan pada *Organ at Risk* (OAR). IMRT memberikan presisi tertinggi pada kasus dengan kompleksitas tinggi, sementara 3D-CRT tetap menjadi alternatif yang efektif dan lebih sederhana, serta *booster* elektron berkontribusi dalam optimalisasi dosis tambahan pada target superfisial.

Namun, keberhasilan radioterapi tidak hanya ditentukan oleh aspek dosimetri, melainkan juga dipengaruhi oleh faktor klinis dan operasional, seperti kontinuitas jadwal fraksionasi, stabilitas fasilitas, dan kepatuhan pasien, yang terbukti berpengaruh terhadap luaran klinis seperti tingkat *survival*. Oleh karena itu, pemilihan teknik radioterapi dalam praktik klinis perlu mempertimbangkan tidak hanya keunggulan teknis, tetapi juga kondisi pasien dan kesiapan fasilitas layanan kesehatan.

Meskipun temuan menunjukkan pola yang konsisten, generalisasi hasil masih terbatas akibat dominasi studi dengan sampel kecil dan kurangnya evaluasi klinis jangka panjang. Dengan demikian, diperlukan penelitian lanjutan dengan desain yang lebih kuat, populasi yang lebih besar, serta integrasi antara parameter dosimetri dan luaran klinis untuk menghasilkan bukti yang lebih komprehensif dan aplikatif dalam pengembangan praktik radioterapi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian dan penulisan artikel *review* ini. Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Institut Teknologi Sumatera (Itera) atas fasilitas, sumber daya, serta lingkungan akademik yang kondusif yang memungkinkan penelitian ini dapat dilakukan dengan baik.

Ucapan terima kasih khusus kami sampaikan kepada Bapak Rafli Filano dan dosen pengampu mata kuliah Fisika Medis, yang telah memberikan bimbingan, arahan ilmiah, serta masukan konstruktif selama proses penyusunan kajian literatur ini. Dukungan, motivasi, dan evaluasi yang diberikan telah menjadi kontribusi penting dalam penyempurnaan hasil penelitian.

Penulis juga berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel ini, termasuk rekan mahasiswa yang turut membangun diskusi akademik dan berbagi referensi ilmiah yang relevan. Akhirnya, penulis menghargai kontribusi semua partisipan dan pihak terkait dalam proses penyusunan *review* jurnal ini. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang fisika medis dan radioterapi.

REFERENSI

- Herlinda Mahdania Harun, N. J. (2022). Evaluasi Pengobatan Radioterapi Pada Pasien Kanker. *JSSCR*, 4(3). doi:<https://doi.org/10.37311/jsscr.v4i3.15794>
- Ira Wulandari, R. P. (2022). Penatalaksanaan Radioterapi Kanker Payudara dengan Teknik Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT). *Jurnal Ilmiah Radiologi*, 10(2), 72-79. doi:10.30596/jir.v10i2.11211
- Laily Izzati Ambarsari, M. I. (2024). Evaluasi Dosimetri pada Kasus Kanker Payudara menggunakan Teknik 3D-CRT. *Jurnal Proteksi Kesehatan*, 13(2), 233-241.

- Fathiyah Nisaaul Haq, Tasya Adinda Putri, Yasmin Aula, I Gde Eka Dirgayusa, Nurul Maulidiyah, Rafli Filano/ JPFS 9 (2) (2026) 103-112
- Muhammad Iqbal S, D. M. (2023). Analisis Perencanaan Radioterapi Menggunakan Teknik Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) pada Pasien Kanker Serviks. *Jurnal Fisika Unand*, 12(1), 165-171. doi:10.25077/jfu.12.1.164170.2023
- Muhammad Surya Negara, I. P. (2023). Facing Problems in Radiotherapy for Breast Cancer. *Media Jurnal Ilmiah Radiologi (MJIR)*, 13(2), 144-149. doi: <https://doi.org/10.46823/mjir.v13i2.463>
- Rahmah Elvira, I. T. (2021). Analisis Perencanaan Radioterapi Pasien Kanker Nasofaring Menggunakan Teknik Intensity Modulated Radiotherapy. *Jurnal Fisika Unand*, 10(3), 337-343. doi:10.25077/jfu.10.3.337343.2021
- Ravindra Shende, Dhoble, S. J., & Gupta, G. (2023). *Dosimetric evaluation of radiation treatment planning for simultaneous integrated boost technique using Monte Carlo simulation*. *Journal of Medical Physics*, 48(3), 298–306. doi:https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_4_23
- Retnoningsih, B. T. (2022). Pengaruh Radioterapi terhadap Rinitis Alergi. *Malang Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery Journal*, 1(1).
- Winarno, W. (2021). Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (LINAC). *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 23(2), 75-86. doi:<https://doi.org/10.20473/jbp.v23i2.2021.75-86>
- Xin Yi, W.-L. L., Dang, J., Huang, W., Cui, H.-X., Wu, W.-C., Li, Y., & Jiang, Q.-F. (2020). *A comprehensive and clinical-oriented evaluation criteria based on DVH information and gamma passing rates analysis for IMRT plan 3D verification*. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 21(8), 48-55. doi: 10.1002/acm2.12910.
- Zulhasyikin Abdul Penyuh, F. Z. (2023). Penatalaksanaan Radioterapi Booster Elektron Pada Kasus Kanker Payudara. *JURNAL RADIOGRAFER INDONESIA*, 110-116.