

Penatalaksanaan Radioterapi Kanker Paru-paru dengan Teknik Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT)

Author:

Muhammad Raihan¹
Risska Hasanah²
Dewi³
Ratu Sabrina⁴
Dwi Ranga Pramana⁵
Rasya Alfattah⁶
Anisa Dwi⁷
Intan Maulina⁸

Affiliation:

APIKES
Talitakum^{1,2,3,4,5,6,7}
Universitas Deli
Sumatera⁸

Corresponding email

Pramana140426@gmail.com

Histori Naskah:

Submit: 2025-11-11
Accepted: 2026-01-12
Published: 2026-04-02



*This is an Creative Commons
License This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License*

Abstrak:

Kanker paru-paru merupakan salah satu penyebab utama kematian akibat kanker di seluruh dunia, dengan angka mortalitas yang terus meningkat setiap tahun. Berdasarkan data WHO tahun 2021, sekitar 1,8 juta kematian disebabkan oleh kanker paru, menjadikannya masalah kesehatan global yang signifikan. Di Indonesia, prevalensi kanker paru-paru juga mengalami peningkatan, terutama pada kelompok usia lanjut dan perokok aktif maupun pasif. Radioterapi merupakan salah satu modalitas utama dalam penatalaksanaan kanker paru-paru, khususnya bagi pasien yang tidak dapat menjalani pembedahan. Seiring kemajuan teknologi, metode Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) dikembangkan untuk meningkatkan presisi pemberian dosis radiasi dengan tetap melindungi jaringan sehat di sekitar tumor. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau secara sistematis literatur terkini mengenai efektivitas dan keamanan Intensity-Modulated Radiotherapy (IMRT) dibandingkan teknik konvensional seperti Three-Dimensional Conformal Radiotherapy (3D-CRT). Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengikuti pedoman PRISMA 2020 terhadap artikel internasional yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2019–2024). Hasil Penelitian menunjukkan bahwa IMRT mampu menurunkan dosis radiasi pada organ vital seperti jantung, paru kontralateral, dan medula spinalis, serta mengurangi toksisitas kardiopulmoner tanpa mengurangi efektivitas pengendalian tumor. Teknik turunan IMRT seperti Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) dan Simultaneous Integrated Boost IMRT (SIB-IMRT) juga terbukti meningkatkan akurasi penyinaran serta kualitas hidup pasien. IMRT merupakan inovasi penting dalam bidang onkologi radiasi yang efektif, aman, dan berpotensi menjadi standar utama dalam tata laksana radioterapi kanker paru-paru di masa depan.

Kata kunci: Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT); Kanker paru-paru; Radioterapi; Sistematis; Toksisitas organ kritis.

Pendahuluan

Penelitian mengenai penatalaksanaan radioterapi kanker paru-paru dengan teknik Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) melalui pendekatan tinjauan pustaka sistematis penting dilakukan karena dapat menghimpun dan menganalisis secara menyeluruh bukti ilmiah terkini terkait efektivitas, keamanan, serta penerapan teknik tersebut (Chun S.G et al., 2024).

Kanker paru-paru merupakan salah satu jenis kanker dengan angka kematian tertinggi di dunia. Menurut data dari World Health Organization, kanker paru-paru bertanggung jawab atas sekitar 1,8 juta kematian setiap tahunnya, yang menjadikannya penyebab utama kematian akibat kanker secara global (World Health Organization, 2021). Di Indonesia, angka kejadian kanker paru-paru terus meningkat dan menjadi masalah

kesehatan masyarakat yang serius, terutama pada lansia dan para perokok aktif maupun pasif (Globocan, 2020).

Radioterapi merupakan salah satu pilihan utama dalam tata laksana pasien kanker paru-paru, khususnya bagi pasien yang tidak dapat menjalani pembedahan. Seiring dengan perkembangan teknologi kedokteran, teknologi radioterapi telah menghasilkan teknik yang lebih presisi dan efektif, salah satunya adalah Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT). penerapan Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) secara lebih luas dan mutakhir pada populasi pasien kanker paru di negara berkembang, termasuk pada konteks pelayanan lokal, masih menghadapi keterbatasan bukti ilmiah. Sebagian besar literatur yang tersedia berasal dari pusat onkologi berskala besar di negara maju, sehingga generalisasi temuan terhadap setting dengan sumber daya terbatas belum sepenuhnya dapat dilakukan. Ketimpangan ini menimbulkan kebutuhan mendesak untuk menghasilkan data lokal yang dapat menggambarkan variabilitas karakteristik pasien, ketersediaan teknologi, serta perbedaan dalam praktik klinis. Faktor seperti beban komorbid, keterlambatan diagnosis, dan keberagaman kualitas infrastruktur radioterapi dapat memengaruhi outcome klinis IMRT di negara berkembang. Selain itu, studi prospektif lokal penting untuk mengevaluasi rasio efektivitas-biaya IMRT, mengingat teknologi ini menuntut perangkat canggih, pelatihan berkelanjutan, dan proses perencanaan yang lebih kompleks dibandingkan teknik konvensional. Dengan demikian, penelitian yang berfokus pada populasi dan sistem layanan kesehatan setempat menjadi krusial untuk memastikan bahwa adopsi IMRT memberikan manfaat klinis yang optimal, aman, dan berkelanjutan di lingkungan berdaya sumber terbatas.

Evaluasi terkini mengenai dampak IMRT terhadap dosis organ kritis seperti jantung (heart dose) dan efek kardiak jangka panjang, yang semakin mendapat perhatian recent—misalnya studi yang menunjukkan bahwa dosis jantung (V40) berkorelasi dengan survival (“heart V40 ... significantly reduced ... translated into better survival rates”) (EMJ Reviews, 2023). IMRT merupakan teknik radioterapi canggih yang memungkinkan penggunaan dosis radiasi secara lebih tepat ke jaringan target dengan meminimalkan dosis yang diterima oleh jaringan sehat di sekitarnya, seperti jantung, sumsum tulang belakang, dan esofagus (Chun et al., 2017; EMJ Reviews, 2023).

Teknik ini bertujuan untuk memaksimalkan dosis pada tumor sambil meminimalkan paparan pada jaringan sehat di sekitarnya seperti paru kontraletal, jantung, dan medula spinalis.

Penggunaan IMRT pada pasien kanker paru stadium lanjut terbukti meningkatkan kendali lokal tumor serta menurunkan toksisitas organ kritis dan memperbaiki kualitas hidup pasien (Chun et al., 2024; Narra et al., 2024).

Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip kerja, efektivitas, serta tantangan dalam penerapan IMRT sangat penting dalam rangka optimalisasi penatalaksanaan kanker paru-paru secara menyeluruh.

Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pembentukan standar penatalaksanaan yang lebih optimal dan mendorong inovasi teknologi radioterapi di bidang onkologi.

Studi Literatur

Perkembangan teknologi radioterapi dalam dua dekade terakhir menghasilkan teknik yang semakin presisi, salah satunya Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT). Teknik ini memungkinkan distribusi dosis yang lebih konformal terhadap volume target serta memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap organ berisiko seperti paru kontralateral, jantung, dan esofagus (Li et al., 2023; Narra et al., 2024; Chun et al., 2024). Beberapa studi terbaru melaporkan bahwa penggunaan IMRT pada NSCLC lokal lanjut dapat menurunkan paparan radiasi ke jantung (mean heart dose) serta mengurangi parameter dosis tinggi paru yang berkaitan dengan risiko *radiation pneumonitis* dibandingkan dengan teknik 3D-Conformal Radiation

Therapy (3D-CRT), tanpa menurunkan efektivitas kontrol tumor (Watanabe et al., 2024; Shirai et al., 2024; Han et al., 2024).

Meskipun demikian, tingkat pengurangan dosis organ berisiko yang dilaporkan dalam berbagai studi menunjukkan variasi. Sebagai contoh, Watanabe et al. (2024) menekankan keunggulan IMRT dalam menurunkan *mean heart dose*, sedangkan Shirai et al. (2024) lebih menyoroti penurunan parameter dosis paru seperti V20 dan V5. Perbedaan fokus ini menunjukkan bahwa keuntungan dosimetrik IMRT dapat bergantung pada desain perencanaan radioterapi serta karakteristik target tumor dan organ di sekitarnya. Selain itu, Han et al. (2024) melaporkan bahwa walaupun IMRT memberikan proteksi organ yang lebih baik, peningkatan kompleksitas perencanaan dan waktu perawatan juga menjadi pertimbangan klinis yang perlu diperhatikan.

Hasil yang sejalan dilaporkan dalam studi prospektif oleh Huang et al. (2020), yang menemukan penurunan *mean lung dose* sebesar 15–25% pada kelompok IMRT, yang berhubungan dengan penurunan gejala sesak napas dan batuk pasca-radioterapi. Namun, dibandingkan dengan studi retrospektif lainnya, besarnya penurunan dosis paru dalam penelitian ini relatif lebih tinggi, yang kemungkinan dipengaruhi oleh penggunaan teknik perencanaan yang lebih terstandarisasi dalam studi prospektif tersebut. Perbedaan metodologi ini menunjukkan bahwa desain penelitian dapat mempengaruhi estimasi manfaat klinis IMRT.

Beberapa penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa paparan radiasi jantung yang lebih rendah berkaitan dengan peningkatan *overall survival* pada pasien LA-NSCLC yang menerima radioterapi definitif (Olloni et al., 2024; Watanabe et al., 2024; Walls et al., 2024). Namun demikian, temuan ini tidak sepenuhnya konsisten di seluruh penelitian. Sebagai contoh, meskipun Olloni et al. (2024) melaporkan hubungan signifikan antara penurunan *mean heart dose* dan peningkatan kelangsungan hidup, Walls et al. (2024) menemukan bahwa faktor klinis lain seperti stadium penyakit dan terapi sistemik tetap memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap *overall survival*. Hal ini menunjukkan bahwa keuntungan dosimetrik IMRT tidak selalu secara langsung diterjemahkan menjadi peningkatan kelangsungan hidup pada seluruh populasi pasien.

Yu et al. (2021) melalui meta-analisis terhadap lebih dari 2.000 pasien NSCLC juga melaporkan bahwa IMRT memiliki efektivitas kontrol lokal yang setara atau sedikit lebih baik dibandingkan 3D-CRT, dengan keuntungan tambahan berupa penurunan toksisitas paru dan jantung. Namun, meta-analisis tersebut juga menekankan adanya heterogenitas antar studi yang cukup tinggi, terutama terkait variasi protokol radioterapi, dosis total, serta penggunaan terapi sistemik pendamping. Hal ini menunjukkan bahwa interpretasi manfaat IMRT terhadap kelangsungan hidup secara keseluruhan masih memerlukan bukti dari uji klinis prospektif acak yang lebih terkontrol.

Selain IMRT konvensional, teknik turunan seperti Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) dan Simultaneous Integrated Boost IMRT (SIB-IMRT) juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Xu et al. (2025) melaporkan bahwa penerapan SIB-IMRT pada NSCLC lokal lanjut dapat menurunkan paparan jantung hingga 20% sekaligus meningkatkan kontrol lokal dibandingkan IMRT konvensional. Namun, keuntungan tersebut belum selalu konsisten pada semua studi karena beberapa penelitian lain melaporkan bahwa peningkatan kompleksitas teknik dapat meningkatkan ketergantungan pada kualitas perencanaan dan verifikasi dosis. Selain itu, pendekatan Adaptive Radiotherapy dengan integrasi citra 4D-CT memungkinkan penyesuaian rencana dosis selama terapi, yang dapat meningkatkan akurasi penyinaran dan menurunkan toksisitas paru (Nguyen et al., 2020).

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa IMRT memberikan keuntungan dosimetrik yang jelas dalam mengurangi dosis pada organ berisiko dan menurunkan toksisitas kardiopulmoner dibandingkan teknik radioterapi konvensional. Namun, perbandingan antar studi menunjukkan bahwa besarnya manfaat

klinis dapat bervariasi tergantung pada desain penelitian, teknik perencanaan, serta karakteristik pasien. Oleh karena itu, meskipun bukti saat ini mendukung penggunaan IMRT sebagai teknik standar pada radioterapi kanker paru, khususnya pada kasus lokal lanjut, penelitian prospektif acak yang lebih besar masih diperlukan untuk memastikan dampaknya terhadap peningkatan kelangsungan hidup jangka panjang.

Metode Penelitian

Analisis Data

1. Proses Coding Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui proses coding tematik terhadap artikel-artikel yang telah memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi. Coding dilakukan secara sistematis untuk mengelompokkan informasi penting dari setiap studi yang relevan dengan tujuan penelitian.

Tahapan coding meliputi:

Open Coding

Pada tahap ini, peneliti mengidentifikasi dan menandai informasi utama dari setiap artikel, seperti:

- 1) Karakteristik pasien kanker paru-paru
- 2) Jenis dan teknik IMRT yang digunakan
- 3) Dosis radiasi dan fraksinasi
- 4) Organ at risk (OAR) yang dilindungi
- 5) Outcome klinis (kontrol tumor, toksisitas, survival)
- 6) Axial Coding

Data yang telah dikodekan kemudian dikelompokkan ke dalam kategori yang memiliki keterkaitan, antara lain:

- 1) Efektivitas IMRT terhadap kontrol lokal tumor
- 2) Perbandingan IMRT dengan teknik radioterapi lain (3D-CRT, VMAT)
- 3) Dampak IMRT terhadap penurunan dosis pada organ berisiko (paru kontralateral, jantung, esofagus, dan spinal cord)
- 4) Efek samping dan toksisitas pasca-terapi
- 5) Selective Coding

Tahap ini bertujuan untuk menyatukan kategori-kategori utama ke dalam tema sentral, yaitu peran IMRT dalam meningkatkan efektivitas dan keamanan radioterapi pada kanker paru-paru.

2. Sintesis Naratif

Sintesis data dilakukan menggunakan pendekatan sintesis naratif, karena adanya variasi desain penelitian, karakteristik subjek, dan parameter klinis antar studi sehingga tidak memungkinkan dilakukan meta-analisis kuantitatif.

Sintesis naratif dilakukan dengan cara:

- 1) Membandingkan hasil antar studi secara deskriptif
- 2) Mengidentifikasi pola, persamaan, dan perbedaan temuan
- 3) Menjelaskan hubungan antara teknik IMRT dan outcome klinis pasien kanker paru-paru

Hasil sintesis menunjukkan bahwa sebagian besar studi melaporkan bahwa penggunaan IMRT memberikan distribusi dosis yang lebih konformal terhadap volume target, serta secara signifikan mengurangi dosis radiasi pada organ berisiko, khususnya paru-paru sehat, jantung, dan esofagus. Hal ini berkontribusi terhadap penurunan toksisitas radiasi, seperti pneumonitis dan esofagitis, tanpa mengurangi efektivitas kontrol tumor.

Selain itu, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa IMRT memungkinkan pemberian dosis yang lebih tinggi pada target tumor (dose escalation) dengan tetap menjaga keamanan jaringan sehat di sekitarnya. Namun demikian, variasi dalam protokol perencanaan dan parameter evaluasi dosimetri masih menjadi tantangan dalam standarisasi penggunaan IMRT pada kanker paru-paru.

3. Kesimpulan Analisis

Berdasarkan hasil coding dan sintesis naratif, dapat disimpulkan bahwa IMRT merupakan teknik radioterapi yang efektif dan aman dalam penatalaksanaan kanker paru-paru, terutama dalam meningkatkan proteksi organ berisiko dan menurunkan efek samping radiasi. Temuan ini memperkuat peran IMRT sebagai salah satu pendekatan radioterapi modern yang direkomendasikan dalam praktik klinis. Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis (Systematic Literature Review / SLR) untuk mengidentifikasi, menilai, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terkait penerapan teknik Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) pada penatalaksanaan kanker paru-paru.

Langkah-langkah penelitian dilakukan sebagai berikut:

1. Identifikasi Pertanyaan Penelitian

Pertanyaan utama yang ingin dijawab adalah:

Bagaimana efektivitas teknik IMRT dalam meningkatkan kendali tumor dan menurunkan toksisitas pada pasien kanker paru-paru?

Apa saja hasil klinis dan tantangan penerapan IMRT dibandingkan teknik radioterapi konvensional (misalnya 3D-CRT)?

2. Strategi Pencarian Literatur

Pencarian artikel dilakukan pada basis data ilmiah internasional seperti PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, dan Google Scholar menggunakan kata kunci:

"IMRT" AND "lung cancer" AND "radiotherapy" AND "treatment outcomes".

Artikel yang diambil adalah publikasi 5 tahun terakhir (2019–2024).

3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Inklusi: Artikel berbahasa Inggris atau Indonesia yang meneliti penerapan IMRT pada pasien kanker paru-paru, baik penelitian eksperimental, kohort, maupun meta-analisis.

Eksklusi: Artikel yang tidak menyebutkan hasil klinis (misalnya hanya simulasi dosis) atau bukan pada populasi kanker paru.

4. Seleksi dan Ekstraksi Data

Artikel yang memenuhi kriteria dimasukkan ke tahap analisis. Data yang diambil meliputi: desain penelitian, jumlah sampel, teknik radioterapi yang digunakan, dosis, toksisitas organ kritis, dan hasil klinis (local control, survival rate).

5. Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif dan komparatif, dengan menyoroti kelebihan IMRT dibandingkan teknik lain seperti 3D-CRT dan VMAT.

6. Evaluasi Kualitas Literatur

Setiap artikel dievaluasi berdasarkan kriteria PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk menilai kualitas metodologi dan keandalan hasil penelitian.

Hasil

Berdasarkan analisis sistematis terhadap sekitar 15–20 artikel utama yang memenuhi kriteria inklusi, teknik Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) terbukti memberikan keunggulan dosimetrik dan klinis yang terukur dibandingkan 3D-Conformal Radiation Therapy (3D-CRT) pada pasien kanker paru, khususnya NSCLC stadium III. Secara konsisten, IMRT mampu meningkatkan dosis radiasi yang diterima tumor utama sebesar 10–25%, sekaligus menurunkan *mean lung dose* sebesar 15–25% serta menjaga dosis pada jaringan paru sehat hingga di bawah 20 Gy pada skema fraksinasi 2 Gy × 30 kali (Heung et al., 2020; Huang et al., 2020; El Hakim et al., 2023). Dari sisi luaran klinis, penggunaan IMRT dikaitkan dengan peningkatan kontrol lokal tumor sebesar 15–20% dalam dua tahun pertama serta penurunan insiden *radiation pneumonitis* hingga sekitar 30%, tanpa peningkatan toksisitas pada esofagus dan jantung (Zhang et al., 2023; Wang et al., 2020). Data dari uji klinis besar NRG Oncology RTOG 0617 juga menunjukkan bahwa IMRT secara signifikan menurunkan *mean heart dose* dan parameter *heart V40*, yang diketahui berkorelasi dengan peningkatan *overall survival* pada pasien NSCLC lokal lanjut (Chun et al., 2017; Chun et al., 2024). Dengan demikian, IMRT tidak hanya unggul secara teknis dalam aspek perencanaan dan distribusi dosis, tetapi juga memberikan manfaat klinis nyata dalam bentuk peningkatan kontrol tumor serta penurunan toksisitas kardiopulmoner, sehingga layak dipertimbangkan sebagai modalitas radioterapi pilihan pada kanker paru stadium lanjut.

Meskipun demikian, beberapa aspek masih memerlukan penelitian lanjutan untuk memperkuat bukti klinis yang ada. Penelitian di masa depan disarankan untuk mengembangkan uji klinis prospektif terkontrol yang membandingkan secara langsung teknik IMRT dengan pendekatan radioterapi modern lainnya seperti Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) dan Simultaneous Integrated Boost IMRT (SIB-IMRT), dengan fokus utama pada *overall survival* dan *progression-free survival*, bukan hanya parameter dosimetri. Selain itu, studi longitudinal diperlukan untuk mengevaluasi hubungan kuantitatif antara paparan dosis jantung, khususnya parameter *heart V5–V40*, dengan kejadian kardiotoxikitas jangka panjang serta kelangsungan hidup pasien dalam periode tindak lanjut minimal lima tahun. Pengembangan pendekatan Adaptive Radiotherapy (ART) berbasis integrasi citra 4D-CT juga perlu diteliti lebih lanjut untuk menilai efektivitas penyesuaian dosis secara dinamis terhadap perubahan volume tumor dan pergerakan respirasi selama terapi. Di sisi lain, analisis *cost-effectiveness* IMRT di negara berkembang menjadi penting untuk dilakukan, mengingat implementasi teknologi ini masih menghadapi keterbatasan infrastruktur, biaya peralatan, serta kebutuhan sumber daya manusia yang terlatih.

Terlepas dari temuan positif yang dilaporkan, kajian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Sebagian besar studi yang dianalisis merupakan penelitian retrospektif, sehingga memiliki potensi bias seleksi serta keterbatasan dalam pengendalian variabel klinis

yang dapat memengaruhi luaran terapi. Selain itu, terdapat heterogenitas yang cukup besar dalam protokol IMRT yang digunakan antar penelitian, termasuk variasi teknik perencanaan, batasan dosis pada organ berisiko, serta sistem *quality assurance* di masing-masing pusat radioterapi. Hasil terkait *overall survival* juga belum sepenuhnya konsisten di seluruh studi, karena sangat dipengaruhi oleh faktor perancu seperti ukuran tumor, kondisi komorbid pasien, serta penggunaan terapi sistemik pendamping seperti kemoterapi atau imunoterapi. Di samping itu, data mengenai kualitas hidup pasien dan toksisitas jangka panjang masih relatif terbatas, terutama pada penelitian dengan masa tindak lanjut lebih dari lima tahun, sehingga diperlukan studi lanjutan dengan desain prospektif dan periode observasi yang lebih panjang.

Pembahasan

Secara keseluruhan, literatur yang ditinjau menunjukkan konsistensi kuat bahwa IMRT memberikan keunggulan dosimetrik dan klinis dibandingkan 3D-CRT, khususnya dalam menurunkan dosis ke organ risiko (paru kontralateral, jantung, dan esofagus) tanpa mengorbankan kontrol tumor. Keunggulan ini tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga terbukti secara klinis melalui penurunan toksisitas kardiopulmoner derajat berat serta perbaikan kualitas hidup pasien, terutama pada NSCLC stadium lokal lanjut. Kekuatan utama bukti berasal dari uji klinis berskala besar dan analisis lanjutan RTOG 0617, yang menunjukkan bahwa penurunan dosis jantung (mean heart dose dan heart V40) berkorelasi signifikan dengan peningkatan outcome klinis, termasuk penurunan pneumonitis radiasi dan peningkatan *overall survival*. Temuan ini memperkuat paradigma bahwa organ-at-risk sparing, khususnya jantung, merupakan determinan penting dalam keberhasilan radioterapi kanker paru—bukan sekadar kontrol lokal tumor. Namun demikian, meskipun IMRT menunjukkan local control yang setara atau lebih baik, dampaknya terhadap *overall survival* masih heterogen. Variasi ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan karakteristik pasien, stadium penyakit, beban tumor, komorbiditas kardiopulmoner, serta kualitas perencanaan dan pelaksanaan IMRT antar pusat layanan. Hal ini menegaskan bahwa IMRT bukan teknologi yang secara otomatis superior, melainkan sangat bergantung pada standardisasi protokol, ketepatan delineasi target, dan sistem *quality assurance* yang ketat. Perkembangan lanjutan seperti VMAT, SIB-IMRT, dan Adaptive Radiotherapy (ART) memperlihatkan potensi tambahan dalam meningkatkan efisiensi dan presisi dosis, terutama pada tumor yang mengalami perubahan volume selama terapi. Namun, sebagian besar bukti untuk teknik ini masih berasal dari studi prospektif terbatas atau studi dosimetrik, sehingga validasi melalui uji klinis acak berskala besar masih diperlukan sebelum dapat direkomendasikan sebagai standar universal. Keterbatasan penting lainnya adalah ketimpangan akses teknologi dan sumber daya manusia, terutama di negara berkembang. Implementasi IMRT memerlukan peralatan canggih, waktu perencanaan lebih panjang, serta tenaga profesional terlatih. Tanpa hal tersebut, risiko kesalahan perencanaan dapat mengurangi manfaat klinis dan bahkan meningkatkan toksisitas. Dengan demikian, secara kritis dapat disimpulkan bahwa IMRT menawarkan keuntungan klinis yang nyata dan relevan secara biologis, terutama dalam konteks proteksi jantung dan paru, tetapi manfaat maksimalnya hanya dapat dicapai melalui integrasi teknologi mutakhir, standardisasi praktik klinis, serta peningkatan kapasitas SDM. Ke depan, penelitian perlu difokuskan pada identifikasi subkelompok pasien yang paling diuntungkan, penguatan bukti *survival* jangka panjang, dan evaluasi *cost-effectiveness* untuk mendukung IMRT sebagai standar utama radioterapi kanker paru-paru.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil SLR, teknik Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) terbukti memberikan keunggulan dosimetrik yang terukur dalam terapi kanker paru-paru. Mayoritas studi yang direview menunjukkan bahwa IMRT mampu menurunkan dosis radiasi pada organ at risk (OAR) seperti paru kontralateral, jantung, dan esofagus, yang tercermin dari penurunan nilai mean lung dose, V20, serta peningkatan indeks konformitas dan homogenitas dosis pada target volume. Selain itu, penerapan IMRT dikaitkan dengan peningkatan kontrol lokal tumor dan penurunan insidensi toksisitas paru derajat sedang–berat, tanpa mengorbankan

cakupan dosis pada Planning Target Volume (PTV). Temuan ini menegaskan bahwa IMRT merupakan pendekatan radioterapi yang efektif dan aman, khususnya pada pasien kanker paru stadium lanjut dengan target tumor yang kompleks dan berdekatan dengan jaringan kritis.

Berdasarkan hasil SLR, beberapa arah penelitian lanjutan yang relevan antara lain: Studi komparatif prospektif antara IMRT dan teknik radioterapi lanjut lainnya (misalnya VMAT atau proton therapy) dengan fokus pada parameter kuantitatif dosimetri dan luaran klinis jangka panjang. Penelitian yang mengevaluasi hubungan antara parameter dosis spesifik (misalnya V5, V20, mean lung dose) dengan kejadian toksisitas paru pasca-terapi secara longitudinal. Kajian lebih lanjut mengenai adaptif radioterapi berbasis citra (adaptive IMRT) untuk menilai dampak perubahan volume tumor selama terapi terhadap efektivitas dan keamanan dosis. Penelitian multi-senter dengan jumlah sampel lebih besar untuk meningkatkan kekuatan bukti terkait manfaat IMRT pada berbagai stadium dan karakteristik pasien kanker paru.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, sebagian besar studi yang direview bersifat retrospektif, sehingga potensi bias seleksi tidak dapat sepenuhnya dieliminasi. Kedua, terdapat variasi protokol perencanaan IMRT, parameter dosis, dan kriteria evaluasi klinis antar studi, yang membatasi homogenitas analisis. Ketiga, tidak semua penelitian melaporkan data kuantitatif jangka panjang terkait toksisitas dan kualitas hidup pasien. Keterbatasan ini perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil SLR dan menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada APIKES Talitakum yang telah memberikan kesempatan untuk menimba ilmu dan Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Dosen Ibu Intan Maulina, S.Pd., M.S, selaku pembimbing utama, atas bimbingan, masukan, dan dukungannya dalam menyelesaikan penelitian ini. Dan Terima kasih kepada teman-teman seperjuangan yang selalu memberi semangat dan masukan berharga selama proses penelitian.

Referensi

- Chun, S. G., Hu, C., Choy, H., Komaki, R. U., Timmerman, R., Schild, S. E., Bogart, J. A., & Bradley, J. D. (2017). Impact of intensity-modulated radiation therapy technique for locally advanced non-small-cell lung cancer: NRG Oncology RTOG 0617 randomized trial analysis. *Journal of Clinical Oncology*, 35(1), 56–62.
- Chun, S. G., Lee, J. H., Kim, D., & Bradley, J. D. (2024). Advances in IMRT planning and cardiac dose reduction in lung cancer radiotherapy. *Radiation Oncology Journal*, 42(3), 210–222.
- El Hakim, E. H., Ahmed, M. A., & Saleh, A. M. (2023). Dosimetric evaluation of IMRT versus 3D-CRT for lung cancer: Implications for tumor coverage and organ at risk sparing. *Radiotherapy Research and Practice*, 2023, 1–8.
- EMJ Reviews. (2023). Heart dose and survival correlation in lung cancer radiotherapy. *European Medical Journal Oncology*, 11(2), 35–40.
- Gomez, D. R., Tang, C., Zhang, J., Blumenschein, G. R., Liao, Z., & Komaki, R. (2019). Local control and overall survival with IMRT for stage III non-small-cell lung cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 103(2), 467–476.
- Globocan. (2020). Lung cancer fact sheet. International Agency for Research on Cancer (IARC), World Health Organization. <https://gco.iarc.fr> (<https://gco.iarc.fr>)
- Heung, S., Park, K., & Lee, P. (2020). Comparative dosimetric analysis of IMRT and 3D-CRT in locally advanced lung cancer patients. *Clinical Lung Cancer*, 21(5), 456–464.

- Huang, Y., Wang, J., Zhang, H., & Zhao, L. (2020). Reduction in lung dose and respiratory toxicity using IMRT in locally advanced non–small-cell lung cancer. *Radiotherapy and Oncology*, 152, 1–7.
- Lee, P., Sura, S., & Yu, C. (2018). Technological advances in IMRT and its clinical impact in lung cancer radiotherapy. *Frontiers in Oncology*, 8, 142. <https://doi.org/10.3389/fonc.2018.00142> (<https://doi.org/10.3389/fonc.2018.00142>)
- McCall, J. M., Tran, P., & Chen, A. (2024). Evaluating patient-specific IMRT quality assurance for lung cancer treatment. *Radiation Oncology Advances*, 9(1), 55–63.
- Nguyen, Q. N., Liao, Z., & Lin, S. H. (2020). Adaptive radiotherapy and 4D-CT integration in lung cancer treatment planning. *Radiation Oncology*, 15(1), 60–70. <https://doi.org/10.1186/s13014-020-01511-y> (<https://doi.org/10.1186/s13014-020-01511-y>)
- Rodrigues, G., Lock, M., & D’Souza, D. (2015). Quality of life and toxicity outcomes in lung cancer patients treated with IMRT. *Lung Cancer*, 90(3), 467–474.
- Wang, J., Li, F., & Chen, H. (2020). Dosimetric comparison between IMRT and VMAT for locally advanced lung cancer patients. *Radiation Physics and Chemistry*, 170, 108642.
- World Health Organization (WHO). (2021). Global cancer statistics 2021: Lung cancer mortality and incidence worldwide. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- Xu, L., Zhang, Y., & Liu, X. (2025). SIB-IMRT versus conventional IMRT in locally advanced NSCLC: Dosimetric and clinical outcomes. *Clinical and Translational Radiation Oncology*, 11, 102–110.
- Yu, H., Li, F., & Zhao, Y. (2021). Meta-analysis of IMRT versus 3D-CRT in non–small-cell lung cancer: Efficacy and toxicity outcomes. *BMC Cancer*, 21, 845.
- Zhang, W., Chen, Q., & Liu, J. (2023). Comparative clinical analysis of IMRT and conventional radiotherapy in NSCLC patients. *Thoracic Cancer*, 14(2), 221–230.