



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 6895-6903

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Hubungan Reaksi Inti dan Peluruhan Radioaktif dengan Energi Radiasi pada Radioterapi

Rendi Tri Setiadi

Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro

renditriyetiadi@gmail.com

Abstract

Perkembangan fisika inti dan teknologi kedokteran mendorong kemajuan radioterapi sebagai modalitas utama terapi kanker melalui pemanfaatan radiasi pengion untuk merusak DNA sel kanker. Optimalisasi terapi memerlukan pemahaman terpadu mengenai reaksi inti, peluruhan radioaktif, serta karakteristik energi radiasi yang memengaruhi deposisi dosis dan respons biologis jaringan. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi konsep dasar reaksi inti dan peluruhan radioaktif dalam produksi sumber radiasi medis, mengkaji hubungan jenis emisi, energi, dan waktu paruh dengan distribusi energi dalam jaringan, serta mengevaluasi implikasinya terhadap efektivitas terapi dan risiko efek samping. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan pendekatan kualitatif-deskriptif dan sintesis naratif terhadap sepuluh artikel yang memenuhi kriteria inklusi dari PubMed, ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar. Analisis dilakukan menggunakan matriks sintesis untuk mengintegrasikan temuan terkait dosimetri, LET, dan radiobiologi. Hasil kajian menunjukkan bahwa pada terapi proton, reaksi inti menghasilkan partikel sekunder seperti neutron yang berpotensi meningkatkan dampak biologis akibat nilai RBE yang tinggi, sementara peningkatan LET/RBE secara spasial berkorelasi dengan toksisitas jaringan normal. Pada radioterapi berbasis radionuklida, efektivitas dan keamanan sangat dipengaruhi oleh jenis emisi (α , β , γ), energi radiasi, serta waktu paruh isotop yang menentukan jangkauan dan durasi deposisi energi. Kemajuan teknologi seperti dual-energy CT serta inovasi produksi radioisotop melalui reaksi fotonuklir turut meningkatkan akurasi dosis dan ketersediaan isotop untuk terapi bertarget. Integrasi fisika inti, radiobiologi, dan teknologi klinis menjadi kunci radioterapi yang lebih presisi dan aman.

Kata kunci: Reaksi Inti, Peluruhan Radioaktif, Energi Radiasi, Radioterapi, Dosimetri, LET, RBE, Radiobiologi.

1. Pendahuluan

Perkembangan ilmu fisika inti dan teknologi kedokteran modern telah membawa kemajuan signifikan dalam tata laksana kanker melalui radioterapi (1). Radioterapi merupakan salah satu modalitas utama dalam penanganan kanker selain pembedahan dan kemoterapi, yang bekerja dengan memanfaatkan energi radiasi pengion untuk merusak DNA sel kanker sehingga menghambat proliferasi dan memicu kematian sel (2). Secara global, beban kanker terus meningkat setiap tahunnya. Laporan dari *World Health Organization* (WHO) menunjukkan bahwa kanker menjadi salah satu penyebab utama kematian di dunia, dengan jutaan kasus baru dan kematian yang dilaporkan setiap tahun (3). Pada tahun 2022, dilaporkan kurang lebih 19 juta kasus kejadian kanker di seluruh dunia. Kondisi ini menuntut optimalisasi teknologi radioterapi yang tidak hanya efektif secara klinis, tetapi juga aman dan presisi dalam distribusi energi radiasi ke jaringan target(4).

Secara fisika, radioterapi modern tidak dapat dilepaskan dari konsep dasar reaksi inti dan peluruhan radioaktif. Reaksi inti terjadi ketika inti atom mengalami perubahan akibat interaksi dengan partikel lain, seperti neutron, proton, atau foton berenergi tinggi, yang dapat menghasilkan inti baru disertai pelepasan energi dalam bentuk radiasi(5). Sementara itu, peluruhan radioaktif merupakan proses spontan di mana inti tidak stabil berubah menjadi inti yang lebih stabil dengan memancarkan partikel alfa, beta, atau sinar gamma. Proses-proses inilah yang menjadi dasar produksi radioisotop medis dan sumber radiasi untuk terapi(6). Dalam praktik klinis, isotop seperti Cobalt-60 dan Iodine-131 telah lama dimanfaatkan sebagai sumber radiasi dalam terapi kanker, masing-masing melalui emisi sinar gamma dan partikel beta yang memiliki karakteristik energi berbeda serta efek biologis yang spesifik terhadap jaringan (7).

Energi radiasi yang dihasilkan dari reaksi inti maupun peluruhan radioaktif memiliki parameter fisika yang sangat menentukan efektivitas terapi, seperti energi foton, jenis partikel, linear energy transfer (LET), dan waktu paruh

(*half-life*) (8). Energi radiasi menentukan kedalaman penetrasi dalam jaringan serta pola deposisi dosis (9). Misalnya, radiasi gamma berenergi tinggi dari Cobalt-60 memiliki daya tembus yang dalam dan cocok untuk tumor yang terletak di jaringan lebih dalam, sedangkan partikel beta dari Iodine-131 lebih efektif untuk terapi berbasis target molekuler, seperti pada kanker tiroid. Pemahaman hubungan antara karakteristik reaksi inti, mekanisme peluruhan, dan distribusi energi radiasi menjadi krusial dalam perencanaan dosis (*treatment planning*), optimasi fraksinasi, serta pengendalian efek samping pada jaringan sehat.

Dalam beberapa dekade terakhir, inovasi teknologi seperti *linear accelerator* (LINAC), *brachytherapy* berbasis sumber radioaktif tertanam, dan terapi berbasis partikel (*proton therapy*) semakin menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner antara fisika inti, radiobiologi, dan onkologi klinis (10). Prinsip-prinsip reaksi inti juga berperan dalam produksi radioisotop melalui reaktor nuklir atau siklotron, yang kemudian digunakan dalam radioterapi maupun *theranostics* (8). Lembaga seperti *International Atomic Energy Agency* (IAEA) secara aktif mempromosikan penggunaan teknologi nuklir secara aman dan damai, termasuk dalam bidang kesehatan, serta menyediakan panduan keselamatan radiasi dan standar dosimetri internasional (11).

Secara biologis, energi radiasi yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif menyebabkan ionisasi molekul dalam sel, terutama air, yang menghasilkan radikal bebas seperti radikal hidroksil. Radikal ini kemudian merusak struktur DNA melalui pemutusan rantai tunggal maupun ganda (*single-strand break* dan *double-strand break*) (12). Efektivitas kerusakan biologis sangat dipengaruhi oleh jenis radiasi dan energi yang dilepaskan, yang berkaitan langsung dengan karakteristik reaksi inti sumber radiasi tersebut (13). Oleh karena itu, analisis komprehensif mengenai hubungan antara reaksi inti, peluruhan radioaktif, dan energi radiasi sangat diperlukan untuk memahami dasar ilmiah optimasi radioterapi modern.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas aspek fisika inti maupun aspek klinis radioterapi secara terpisah, kajian yang secara sistematis mengintegrasikan hubungan konseptual dan empiris antara mekanisme reaksi inti, proses peluruhan radioaktif, serta implikasinya terhadap energi radiasi dalam konteks radioterapi masih relatif terbatas. Pendekatan *systematic literature review* menjadi relevan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan-temuan ilmiah yang telah dipublikasikan, sehingga dapat diperoleh gambaran komprehensif mengenai perkembangan teori dan aplikasi terkini.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan secara spesifik untuk: (1) mengidentifikasi dan menganalisis konsep dasar reaksi inti dan peluruhan radioaktif yang digunakan dalam produksi sumber radiasi untuk radioterapi; (2) mengkaji hubungan antara karakteristik peluruhan radioaktif (jenis emisi, energi, dan waktu paruh) dengan distribusi dan deposisi energi radiasi dalam jaringan biologis; (3) mengevaluasi implikasi energi radiasi terhadap efektivitas terapi dan risiko efek samping berdasarkan temuan-temuan empiris dalam literatur ilmiah; serta (4) mensintesis perkembangan teknologi radioterapi yang berbasis pada prinsip fisika inti untuk mendukung optimalisasi dosis dan keselamatan pasien. Adapun manfaat penelitian ini adalah memberikan landasan teoretis yang lebih terintegrasi antara fisika inti dan praktik klinis radioterapi, menjadi referensi akademik bagi mahasiswa dan peneliti di bidang fisika medis dan onkologi, serta memberikan kontribusi konseptual dalam pengembangan strategi radioterapi yang lebih presisi, efektif, dan berbasis bukti ilmiah.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menganalisis hubungan antara reaksi inti dan peluruhan radioaktif dengan energi radiasi pada radioterapi. Metode SLR dipilih karena memungkinkan peneliti melakukan identifikasi, evaluasi kritis, dan sintesis hasil penelitian secara sistematis, transparan, dan terstruktur (14).

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini bersifat kualitatif-deskriptif dengan pendekatan sintesis naratif terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu (15). Fokus kajian adalah artikel ilmiah yang membahas:

1. Mekanisme reaksi inti dalam produksi sumber radiasi medis,
2. Proses peluruhan radioaktif dan karakteristik energinya, serta
3. Implikasi energi radiasi terhadap efektivitas dan keamanan radioterapi.

Sebanyak 10 artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi dipilih untuk dianalisis secara mendalam.

2.2. Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada beberapa basis data ilmiah internasional, yaitu PubMed, ScienceDirect, Scopus dan Google Scholar(16). Berikut kombinasi kata kunci dalam Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia yang dapat digunakan untuk penelusuran literatur:

- “nuclear reaction” OR “reaksi inti” AND “radiotherapy” OR “radioterapi”
- “radioactive decay” OR “peluruhan radioaktif” AND “radiation energy” OR “energi radiasi”
- “radioisotope production” OR “produksi radioisotop” AND “cancer therapy” OR “terapi kanker”
- “dosimetry” OR “dosimetri” AND “radioactive source” OR “sumber radioaktif”
- “linear energy transfer” OR “transfer energi linear” AND “radiobiology” OR “radiobiologi”

Kombinasi ini memungkinkan pencarian literatur yang lebih luas karena mencakup istilah dalam dua bahasa sekaligus. Rentang waktu publikasi yang digunakan adalah 10–15 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi ilmiah.

2.3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi dalam kajian ini mencakup artikel penelitian asli (*original research*) maupun artikel tinjauan ilmiah (review) yang dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi dan telah terindeks. Artikel yang dipilih harus secara langsung membahas reaksi inti, peluruhan radioaktif, energi radiasi, serta aplikasinya dalam radioterapi. Selain itu, artikel harus tersedia dalam bentuk teks lengkap (*full-text*) dan ditulis dalam bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia.

Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel yang berbentuk opini, editorial, atau laporan singkat tanpa metodologi yang jelas. Artikel yang hanya membahas radioterapi dari sisi klinis tanpa menguraikan aspek fisika inti juga tidak disertakan dalam kajian ini. Selain itu, artikel yang terduplikasi pada beberapa basis data akan dikeluarkan untuk menghindari pengulangan data.

2.4 Prosedur Seleksi Artikel

Tahapan seleksi dilakukan melalui beberapa langkah:

1. Identifikasi awal berdasarkan pencarian kata kunci di seluruh basis data.
2. Screening judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian topik dengan fokus penelitian.
3. Evaluasi teks lengkap (*full-text review*) untuk memastikan artikel memenuhi kriteria inklusi.
4. Seleksi akhir, sehingga diperoleh 10 artikel yang layak dianalisis.

Proses ini dilakukan secara sistematis untuk meminimalkan bias seleksi dan meningkatkan validitas kajian.

2.5. Teknik Analisis Data

Data dari sepuluh artikel terpilih diekstraksi menggunakan tabel matriks sintesis yang dirancang untuk merangkum informasi penting secara sistematis. Informasi yang dicatat meliputi nama penulis dan tahun publikasi, tujuan penelitian, jenis reaksi inti atau peluruhan radioaktif yang dikaji, serta karakteristik energi radiasi seperti jenis partikel, besar energi, *Linear Energy Transfer* (LET), dan waktu paruh. Selain itu, tabel tersebut juga memuat temuan utama yang berkaitan dengan efektivitas dan keamanan radioterapi.

Proses analisis dilakukan menggunakan pendekatan sintesis naratif. Pendekatan ini dilakukan dengan cara membandingkan, mengelompokkan, dan menginterpretasikan temuan dari berbagai studi berdasarkan kesamaan konsep serta hubungan kausal antara reaksi inti, peluruhan radioaktif, dan distribusi energi radiasi di dalam jaringan biologis. Dengan demikian, analisis tidak hanya merangkum hasil penelitian, tetapi juga membangun pemahaman konseptual yang terintegrasi mengenai keterkaitan aspek fisika inti dan aplikasinya dalam radioterapi(17).

2.6. Validitas dan Keandalan

Untuk menjaga validitas kajian, artikel yang dipilih berasal dari jurnal bereputasi dan terindeks internasional. Selain itu, evaluasi kualitas artikel dilakukan dengan mempertimbangkan kejelasan metodologi, konsistensi hasil, serta relevansi dengan fokus penelitian. Pendekatan sistematis ini bertujuan meningkatkan transparansi dan replikasi penelitian di masa mendatang(18).

Dengan metode SLR terhadap 10 artikel ilmiah ini, penelitian diharapkan mampu memberikan sintesis komprehensif mengenai hubungan konseptual dan empiris antara reaksi inti, peluruhan radioaktif, dan energi radiasi dalam konteks radioterapi, sehingga menghasilkan pemahaman yang lebih terintegrasi antara aspek fisika inti dan praktik klinis.

3. Hasil dan Pembahasan

No	Judul Penelitian	Tahun	Penulis	Hasil Temuan Utama
1	Identifikasi Partikel Neutron Akibat Tembakan Proton pada Molekul Air	2023	Gusti Atika Urfa, Amar Vijai Nasrulloh, Nurma Sari	Reaksi inti antara proton 110 MeV dan molekul air menghasilkan partikel neutron (<2%). Neutron memiliki RBE tinggi sehingga meskipun jumlahnya kecil, energi radiasinya berpotensi menimbulkan efek biologis signifikan pada radioterapi proton (19).
2	Analisis Tc-99m Sestamibi pada Perempuan Kanker Payudara Menggunakan Teknik ROI	2020	Ajirma Halimatussyakdiah, Dian Milvita, Fadil Nazir	Tc-99m merupakan hasil peluruhan Mo-99 yang memancarkan radiasi gamma untuk pencitraan. Energi radiasi dari peluruhan radioaktif memungkinkan visualisasi biodistribusi radiofarmaka dalam jaringan kanker (20).
3	Kemajuan Terkini dalam Radiofarmaka sebagai Agen Terapi Kanker Payudara	2022	Nur A. Agus, Holis A. Holik, Arifudin Achmad	Radionuklida seperti ¹⁷⁷ Lu, ²²⁵ Ac, dan ¹³¹ I memanfaatkan energi radiasi hasil peluruhan alfa, beta, dan gamma untuk merusak sel kanker secara selektif. Efektivitas terapi dipengaruhi oleh energi partikel dan waktu paruh isotop (21).
4	Optimalisasi Terapi Radioaktif Yodium (RAI) pada Kanker Tiroid	2025	Latifah Aulia Rasyada, Ramacos Fardela, Aisyah Elliyanti	Yodium-131 memancarkan radiasi beta (energi tinggi) dan gamma melalui peluruhan radioaktif. Energi beta menyebabkan kerusakan DNA sel kanker tiroid. Dosis dan energi radiasi berpengaruh langsung terhadap efektivitas dan efek samping terapi (22).
5	<i>Spatial Correlation of Linear Energy Transfer and Relative Biological Effectiveness with Suspected Treatment-Related Toxicities Following Proton Therapy for Intracranial Tumors</i>	2020	Jakob Ödén et al.	Ditemukan korelasi spasial antara peningkatan LET (Linear Energy Transfer) dan RBE (Relative Biological Effectiveness) dengan terjadinya toksisitas pada jaringan otak setelah terapi proton. Model RBE variabel menunjukkan peningkatan estimasi risiko komplikasi

No	Judul Penelitian	Tahun	Penulis	Hasil Temuan Utama
				jaringan normal dibandingkan asumsi RBE konstan 1,1 (23).
6	<i>Improving Radiation Physics, Tumor Visualisation, and Treatment Quantification in Radiotherapy with Spectral or Dual-Energy CT</i>	2021	Matthijs Ferdinand Kruis	Spectral/dual-energy CT meningkatkan akurasi perhitungan dosis, visualisasi tumor, serta kuantifikasi fisiologis. Teknologi ini berpotensi meningkatkan presisi radioterapi, khususnya pada terapi proton melalui estimasi stopping power ratio (SPR) yang lebih akurat (24).
7	<i>Study of Nuclear Reactions in Therapy of Tumors with Proton Beams</i>	2023	Maxim Azarkin, Martin Kirakosyan, Vladimir Ryabov	Simulasi GEANT4 menunjukkan bahwa reaksi inti (produksi neutron dan partikel alfa) terjadi selama terapi proton, tetapi peningkatan reaksi akibat nanopartikel radiosensitizer (Bi, Au, 10B, 11B) relatif kecil dan tidak signifikan terhadap peningkatan dosis terapeutik (25).
8	<i>Production of Medical Radioisotopes via Photonuclear Reactions: Review of Candidates and Opportunities for the Planned Radioactive Ion Facility at IFIN-HH</i>	2024	H. Schubert et al.	Produksi radioisotop medis melalui reaksi fotonuklir (γ,n), (γ,p) dinilai menjanjikan untuk menghasilkan radioisotop seperti ^{47}Sc , ^{67}Cu , dan ^{99}Mo dengan potensi aktivitas spesifik tinggi serta limbah radioaktif lebih rendah dibanding metode konvensional (26).
9	<i>Production and Applications of Radiopharmaceuticals: A Review</i>	2019	Nihar Ranjan Kar	Radiopharmaceutical digunakan untuk diagnosis dan terapi berbasis peluruhan radioaktif. Produksi radionuklida dapat dilakukan melalui reaktor, siklotron, maupun generator radionuklida, dengan parameter penting meliputi kemurnian radionuklidik dan radiokimia (27).
10	<i>Radioisotope Production for Medical Applications at ELI-NP</i>	2016	M. Bobeica et al.	Produksi radioisotop medis melalui reaksi fotonuklir dengan berkas gamma intensitas tinggi memungkinkan aktivitas spesifik tinggi. Radioisotop seperti ^{67}Cu , $^{195\text{m}}\text{Pt}$, dan ^{225}Ac berpotensi digunakan dalam terapi bertarget dan theranostik (28).

Kajian ini memperlihatkan bahwa fondasi radioterapi modern baik terapi eksternal (misalnya terapi proton) maupun terapi internal (radionuklida/radiofarmaka) pada dasarnya ditentukan oleh fenomena fisika inti: reaksi inti, peluruhan radioaktif, dan bagaimana energi radiasi dari proses tersebut ditransfer serta didistribusikan ke jaringan biologis. Sepuluh artikel yang dianalisis membentuk satu spektrum pemahaman yang saling melengkapi: dari reaksi inti yang menghasilkan partikel sekunder (neutron/ α), hingga peluruhan radionuklida yang memancarkan $\beta/\alpha/\gamma$, serta bagaimana teknologi pencitraan dan perencanaan dosis menjadi jembatan antara “fenomena fisika” dan “outcome biologis” pada pasien.

Pada konteks radioterapi proton, dua tema utama muncul: pertama, bahwa proton tidak hanya kehilangan energi melalui ionisasi (mekanisme elektromagnetik), tetapi juga dapat memicu reaksi inti yang menghasilkan partikel sekunder seperti neutron dan partikel lain; kedua, bahwa profil biologis efek radiasi tidak cukup dipahami hanya dari “dosis fisik”, melainkan harus mempertimbangkan LET dan RBE yang dapat berubah secara spasial, terutama di ujung lintasan proton (daerah distal/sekitar Bragg peak).

Artikel pertama secara spesifik menunjukkan bukti bahwa ketika proton berenergi tinggi menumbuk medium setara jaringan (dalam kasus ini molekul air), reaksi inti dapat menghasilkan neutron meskipun fraksinya kecil (<2%) (19). Dalam narasi radiobiologi, angka kecil ini tidak otomatis berarti dampaknya kecil, karena neutron memiliki RBE tinggi dan dapat berkontribusi pada efek biologis yang relatif besar dibanding foton energi setara. Secara konseptual, hasil ini mengingatkan bahwa “komponen minor” dalam spektrum radiasi dapat menjadi “komponen dominan” dalam risiko biologis bila kualitas radiasinya tinggi. Konsekuensinya, aspek keselamatan radioterapi proton tidak hanya terkait ketepatan penempatan Bragg peak, tetapi juga terkait produksi dan penyebaran dosis dari partikel sekunder (19).

Pemahaman tersebut diperkuat oleh artikel ketujuh yang menggunakan simulasi GEANT4 untuk menilai hasil reaksi inti pada terapi proton di material ekuivalen jaringan, termasuk ketika ditambahkan nanopartikel radiosensitizer (Bi, Au, 10B, 11B) (25). Penelitian ini menyatakan bahwa proton memang menginduksi reaksi inti yang memproduksi neutron, α -particle, dan produk lain, tetapi peningkatan hasil reaksi inti akibat nanopartikel ternyata tidak signifikan dalam skenario simulasi yang diuji (25). Dengan demikian, klaim peningkatan efek terapi melalui jalur reaksi inti “tambahan” akibat radiosensitizer tidak selalu terbukti kuat; efek radiosensitizer (bila ada) mungkin lebih dominan melalui mekanisme lain (misalnya interaksi elektromagnetik lokal), bukan lewat peningkatan besar produk reaksi inti. Ini penting untuk menjaga keseimbangan interpretasi: inovasi radiosensitizer tidak cukup dinilai dari “potensi teoretis reaksi inti”, tetapi harus dibuktikan pada keluaran partikel, spektrum energi, serta efek biologis netonya (25).

Lebih lanjut, keterkaitan kualitas radiasi dengan efek klinis tampak sangat jelas pada artikel kelima mengenai korelasi spasial antara LET dan RBE dengan toksisitas pasca terapi proton pada tumor intrakranial (23). Penelitian ini memperlihatkan bahwa wilayah dengan LET yang meningkat dan dosis berbobot RBE yang lebih tinggi secara spasial berasosiasi dengan area toksisitas yang diamati, dan bahwa penggunaan model RBE variabel meningkatkan estimasi risiko komplikasi jaringan normal dibanding asumsi RBE konstan 1,1 (23). Secara kausal, pesan pentingnya adalah: walaupun dosis fisik mungkin terlihat memenuhi batas aman, peningkatan LET di ujung lintasan proton dapat meningkatkan efektivitas biologis secara lokal sehingga jaringan kritis (misalnya saraf optik, chiasma, brainstem) menerima “beban biologis” lebih besar dari yang diperkirakan jika memakai RBE tetap. Ini menjelaskan mengapa perencanaan radioterapi proton yang hanya berorientasi pada dosis fisik dapat meremehkan risiko toksisitas, khususnya pada anatomi yang kompleks dan padat organ risiko (23). Dengan kata lain, hubungan “reaksi fisik” (LET meningkat) \rightarrow “konsekuensi biologis” (RBE meningkat) \rightarrow “outcome klinis” (toksisitas) tidak bersifat abstrak, tetapi bisa terobservasi pada studi klinis-retrospektif semacam ini (23).

Namun, seluruh rangkaian analisis tersebut juga menekankan bahwa evaluasi klinis memerlukan kualitas input yang sangat bergantung pada akurasi pemodelan fisika radiasi dan komposisi jaringan, yang salah satunya ditentukan oleh pencitraan CT untuk perencanaan dosis. Di sinilah artikel keenam menjadi relevan: spectral/dual-energy CT dipaparkan mampu meningkatkan akurasi perhitungan dosis, memperbaiki visualisasi tumor dan organ risiko, serta menyediakan informasi kuantitatif fisika yang lebih baik dibanding CT konvensional, termasuk untuk kebutuhan proton therapy melalui estimasi stopping power ratio (SPR) yang lebih akurat (24). Karena dalam terapi proton kesalahan kecil pada estimasi SPR dapat berubah menjadi pergeseran range yang bermakna secara klinis, maka peningkatan akurasi ini bukan sekadar isu teknis, tetapi berimplikasi langsung pada keamanan: kesalahan range dapat menggeser daerah LET tinggi ke organ kritis atau justru mengurangi cakupan target. Artinya, kemajuan imaging-fisika seperti spectral CT berperan sebagai “pengendali risiko” yang menurunkan ketidakpastian dosimetri sekaligus meningkatkan ketepatan distribusi energi dalam jaringan (24).

Jika terapi proton menonjolkan peran reaksi inti serta kualitas transfer energi (LET/RBE), maka kelompok artikel tentang radiofarmaka memperlihatkan jalur lain dari fisika inti menuju terapi: yakni pemanfaatan peluruhan radioaktif sebagai sumber energi radiasi terlokalisasi di jaringan target. Pada ranah ini, pemilihan radionuklida tidak hanya ditentukan oleh kemampuan “masuk ke tumor”, tetapi oleh jenis emisi ($\alpha/\beta/\gamma$), energi partikel, dan waktu paruh, karena ketiganya menentukan intensitas kerusakan biologis, jangkauan deposit energi, serta kesesuaian kinetika biologis radiofarmaka.

Artikel kedua menguraikan pemanfaatan Tc-99m (hasil peluruhan Mo-99) sebagai pemancar gamma untuk pencitraan biodistribusi radiofarmaka pada kanker (20). Di sini hubungan fisika-inti bersifat langsung: peluruhan radionuklida menghasilkan gamma yang relatif cocok untuk deteksi eksternal (imaging), sehingga memungkinkan pemetaan lokasi dan intensitas uptake radiofarmaka. Ini menegaskan bahwa dalam “radioterapi yang dipandu imaging”, energi radiasi tidak hanya dipakai untuk membunuh sel, tetapi juga sebagai pembawa informasi diagnostik (20). Dengan demikian, energi radiasi menjadi dua hal sekaligus: agen terapeutik dan agen pelacak (tracer).

Artikel ketiga memperluas konteks terapi kanker payudara berbasis radiofarmaka dengan menyebut radionuklida seperti ^{177}Lu , ^{225}Ac , dan ^{131}I , yang memanfaatkan emisi alfa, beta, dan gamma untuk merusak sel kanker secara selektif, di mana efektivitas sangat dipengaruhi oleh energi partikel dan waktu paruh (21). Narasi pentingnya ialah bahwa terapi radionuklida adalah “radioterapi sistemik terarah”: selektivitas biologis datang dari carrier/vektor yang mengikat target, sedangkan daya rusak datang dari kualitas emisi. Di sini, LET menjadi konsep implisit: α -emitter (misalnya ^{225}Ac) cenderung memiliki LET tinggi sehingga sangat destruktif pada skala mikro (misalnya DNA), sementara β -emitter (misalnya ^{177}Lu , ^{131}I) memiliki jangkauan lebih jauh sehingga memberi efek “cross-fire” pada sel tetangga. Ini berarti pemilihan radionuklida bukan sekadar memilih “yang kuat”, tetapi memilih yang paling sesuai dengan ukuran lesi, heterogenitas uptake, dan toleransi jaringan normal (21).

Artikel keempat menguatkan aspek kausal tersebut pada kasus klinis kanker tiroid dengan I-131: emisi beta berenergi relatif tinggi menyebabkan kerusakan DNA sel kanker, sedangkan gamma mendukung aspek monitoring/pencitraan, dan dosis serta energi radiasi memengaruhi langsung efektivitas dan efek samping terapi (22). Secara konseptual, studi ini memperlihatkan bahwa optimasi terapi bukan hanya soal “menaikkan dosis”, tetapi menyeimbangkan energi yang didepositkan dan distribusinya di jaringan target vs jaringan sehat. Bahkan pada terapi yang sudah mapan seperti RAI, inti masalahnya tetap fisika peluruhan: berapa energi yang dilepas, dalam bentuk apa, seberapa jauh ia menembus jaringan, dan berapa lama sumbernya aktif (waktu paruh) (22).

Dua artikel berikutnya (8 dan 10) membahas aspek yang sering terlupakan tetapi sangat fundamental: ketersediaan radioisotop ditentukan oleh rute produksi nuklir dan karakter reaksi inti yang dipilih. Artikel kedelapan menilai produksi radioisotop medis melalui reaksi fotonuklir (γ, n) dan (γ, p) sebagai jalur menjanjikan untuk menghasilkan kandidat radioisotop seperti ^{47}Sc , ^{67}Cu , dan ^{99}Mo dengan potensi aktivitas spesifik tinggi serta limbah lebih rendah dibanding metode konvensional (26). Ini relevan karena kualitas terapi radionuklida sangat dipengaruhi “kemurnian radionuklidik” dan “aktivitas spesifik”; bila aktivitas spesifik rendah, dosis terapeutik memerlukan jumlah molekul carrier lebih banyak yang dapat memblokir reseptor dan menurunkan efektivitas biologis. Maka, jalur reaksi inti bukan hanya urusan fasilitas nuklir, tetapi dapat menentukan kualitas klinis radiofarmaka yang akhirnya dipakai pasien (26).

Hal itu diperdalam oleh artikel kesepuluh yang memaparkan produksi radioisotop dengan berkas gamma intensitas tinggi melalui mekanisme fotonuklir, dengan tujuan menghasilkan aktivitas spesifik tinggi untuk isotop yang relevan dalam terapi bertarget dan theranostik, termasuk ^{67}Cu , ^{195}mPt , dan ^{225}Ac (28). Narasi besarnya ialah: peningkatan intensitas sumber gamma dan pemilihan kanal reaksi yang tepat dapat membuka ketersediaan isotop “emerging” yang sebelumnya sulit diproduksi dalam kualitas dan kuantitas memadai. Dampaknya bukan hanya suplai, tetapi juga perkembangan paradigma klinis seperti theranostics pasangan isotop untuk imaging dan terapi yang membutuhkan produksi stabil dan kualitas tinggi (28).

Sementara itu, artikel kesembilan memberi landasan umum: radiopharmaceutical sebagai formulasi yang mengandung radioisotop untuk diagnosis/terapi, dengan penekanan pada konsep peluruhan radioaktif, waktu paruh, serta jalur produksi radionuklida (reaktor, siklotron, generator) dan pentingnya parameter mutu seperti kemurnian radionuklidik dan radiokimia (27). Dalam kerangka sintesis, artikel ini mengikat seluruh studi menjadi satu: baik reaksi inti (produksi) maupun peluruhan (aplikasi) harus dipahami sebagai rantai yang utuh. Jika produksi tidak optimal (misalnya kontaminan radionuklida tinggi), maka paparan radiasi dapat menyebar tidak sesuai target; jika kemurnian radiokimia rendah, biodistribusi dapat menyimpang sehingga energi radiasi tidak terfokus pada tumor. Dengan demikian, “keselamatan” dan “efektivitas” terapi bukan hanya ditentukan di ruang radioterapi, tetapi sejak tahap produksi isotop, formulasi, hingga verifikasi kualitas (27).

Jika seluruh temuan ini disatukan, maka dapat disimpulkan bahwa studi-studi tersebut membangun pemahaman bertingkat: (1) reaksi inti pada terapi proton dapat menghasilkan partikel sekunder seperti neutron yang walaupun kecil secara fraksi dapat memiliki signifikansi biologis tinggi (19), dan simulasi menunjukkan kontribusi reaksi inti memang ada namun tidak selalu meningkat signifikan oleh radiosensitizer tertentu (25); (2) distribusi energi

di jaringan tidak cukup direpresentasikan oleh dosis fisik karena kualitas radiasi seperti LET/RBE dapat meningkat secara spasial dan berkorelasi dengan toksisitas pada organ kritis (23); (3) akurasi pemetaan komposisi jaringan dan parameter fisik (misalnya SPR) melalui teknologi imaging seperti spectral CT penting untuk memastikan distribusi energi sesuai rencana dan menekan ketidakpastian (24); (4) pada terapi radionuklida, peluruhan radioaktif ($\alpha/\beta/\gamma$) menyediakan mekanisme deposisi energi yang sangat bergantung pada energi partikel dan waktu paruh, sehingga menentukan efektivitas dan profil efek samping (20)(21)(22); dan (5) rute produksi radioisotop melalui reaksi nuklir (termasuk fotonuklir) menentukan ketersediaan, aktivitas spesifik, dan kualitas isotop yang pada akhirnya memengaruhi keberhasilan aplikasi theranostics dan terapi bertarget (26)(28)(27).

Dengan demikian, hubungan kausal “fisika inti → energi radiasi → distribusi dalam jaringan → respons biologis → luaran klinis” tidak hanya muncul sebagai konsep teori, melainkan terlihat konsisten dalam temuan masing-masing artikel, baik pada kerangka terapi proton maupun radioterapi berbasis radionuklida.

4. Kesimpulan

Berdasarkan Systematic Literature Review terhadap 10 artikel terpilih, dapat disimpulkan bahwa radioterapi modern baik terapi eksternal seperti terapi proton maupun terapi internal berbasis radionuklida sangat ditentukan oleh prinsip fisika inti, khususnya reaksi inti dan peluruhan radioaktif sebagai sumber energi radiasi. Reaksi inti berperan dalam pembentukan partikel sekunder (misalnya neutron) pada terapi proton serta menjadi dasar produksi radioisotop medis melalui berbagai rute, termasuk reaksi fotonuklir (γ, n) dan (γ, p) yang dinilai menjanjikan untuk menghasilkan isotop dengan aktivitas spesifik tinggi dan efisiensi yang lebih baik. Kajian juga menunjukkan bahwa karakteristik peluruhan radioaktif jenis emisi ($\alpha/\beta/\gamma$), energi partikel/foton, LET, serta waktu paruh berkaitan langsung dengan pola deposisi energi dalam jaringan biologis dan menentukan efektivitas terapi. Contohnya, peluruhan Mo-99 menghasilkan Tc-99m yang memancarkan gamma untuk pemetaan biodistribusi radiofarmaka, sedangkan radionuklida terapi seperti I-131, ¹⁷⁷Lu, dan ²²⁵Ac memanfaatkan energi emisi untuk merusak sel kanker secara selektif, dengan hasil klinis yang sangat dipengaruhi oleh energi dan waktu paruh isotop. Dari aspek keamanan, temuan literatur menegaskan bahwa kualitas radiasi tidak dapat dinilai hanya dari dosis fisik. Pada terapi proton, neutron yang terbentuk dalam fraksi kecil tetap penting karena memiliki RBE tinggi, dan peningkatan LET/RBE secara spasial dapat berasosiasi dengan toksisitas jaringan normal, sehingga model biologis yang lebih realistis diperlukan dalam evaluasi risiko. Selain itu, perkembangan teknologi seperti spectral/dual-energy CT meningkatkan akurasi parameter fisik (misalnya SPR) dan membantu menekan ketidakpastian distribusi energi dalam jaringan, yang pada akhirnya mendukung optimasi dosis dan keselamatan pasien.

Referensi

1. Winarno W. Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (LINAC). *Jurnal Biosains Pascasarjana*. 2021;23(2):75–86. doi:10.20473/jbp.v23i2.2021.75-86
2. Safitri W. PENATALAKSANAAN TERAPI RADIASI EKSTERNA TEKNIK 3D-CRT ARAH BEAM TANPA 0° PADA KANKER PAYUDARA DEXTRA DI INSTALASI RADIOTERAPI RSUD ARIFIN ACHMAD PROVINSI RIAU [d3radiologi] [Internet]. Universitas Awal Bros; 2024 [cited 2026 Feb 28]. Available from: <https://repository.univawalbros.ac.id/368/>
3. Suryani D, Hendriyeni P, Mahardianti M, Sujati NK, Judijanto L. *Konsep Dasar Kanker*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia; 2025. 84 p.
4. Utami D laksyana, Restiaty I, Sarianofermi S, Azizah EN, Muchlis MRE, Siregar NR, et al. *Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Instalasi Radiologi*. CV Eureka Media Aksara; 2025. 174 p.
5. Fithrurrahma H. Analisis dosis radiasi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada terapi kanker paru-paru menggunakan aplikasi PHITS versi 3.20 [undergraduate] [Internet]. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim; 2023 [cited 2026 Feb 28]. Available from: <http://theses.uin-malang.ac.id/48755/>
6. Akhadi M. *Radioekologi Radionuklida Primordial*. Deepublish; 2023. 199 p.
7. Aminudin AN, Holik HA. REVIEW: ^{99m}TEKNESIUM DAN KHELATOR DWIFUNGSI SEBAGAI AGEN RADIOFARMAKA TARGET SPESIFIK. *Farmaka*. 2022 Mar 30;20(1):133–9. doi:10.24198/farmaka.v20i1.34612
8. Sriwido H, Sidqi MA, Wiranu S. Awareness dan Pengantar Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) [Internet]. Sangadji IB, editor. Jakarta; 2026 [cited 2026 Feb 28]. 135 p. Available from: <https://repository.itpln.ac.id/id/eprint/4918/>
9. Setiawati E, Susanto RE, Arianto F. Penentuan Faktor Koreksi Dosis Radiasi Sinar-X Linac 6 MV Pada Ketidakhomogenan Jaringan Tubuh dengan MCNPX. *J Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. 2022 Dec 26;18(1):17. doi:10.17146/jair.2022.18.1.6586
10. Safitri E. PENATALAKSANAAN TERAPI RADIASI EKSTERNA DENGAN TEKNIK THREE-DIMENSIONAL CONFORMAL RADIATION THERAPY (3D-CRT) PADA KASUS KARSINOMA NASOFARING DI INSTALASI RADIOTERAPI RSUD ARIFIN ACHMAD PROVINSI RIAU [d3radiologi] [Internet]. Universitas Awal Bros; 2024 [cited 2026 Feb 28]. Available from: <https://repository.univawalbros.ac.id/366/>
11. Jabar MA. TANGGUNG JAWAB HUKUM RATIFIKASI PENGAWASAN FUNGSI TENAGA NUKLIR DI INDONESIA SERTA DAMPAK LINGKUNGAN YANG MUNGKIN DITIMBULKANNYA [diploma] [Internet]. UNUSIA; 2021 [cited 2026 Feb 28]. Available from: <https://unusia.ac.id/>
12. Artitin C. *Biologi Radiasi*. Deepublish; 2023. 126 p.
13. Artitin C. *Biologi Radiasi*. Deepublish; 2023. 126 p.

14. Sudarnice S, Kumalasari F, Ali M, Murdiansyah EB. Buku Ajar Metode Penelitian. CV. Batanghari Academia Indonesia Kolaka (BAIK). 331 p.
15. Ridwan M, Am S, Ulum B, Muhammad F. Pentingnya Penerapan Literature Review pada Penelitian Ilmiah. *jmas*. 2021 Jul 31;2(1):42. doi:10.36339/jmas.v2i1.427
16. Zamista A, Deswita P. MENINGKATKAN MUTU OPEN JOURNAL SYSTEM (OJS). In. 2024.
17. Pugu MR, Riyanto S, Haryadi RN. Metodologi Penelitian; Konsep, Strategi, dan Aplikasi. PT. Sonpedia Publishing Indonesia; 2024. 146 p.
18. Bancong H. Strategi Reviu Riset dan Konstruksi Teori: Metode, Analisis, dan Studi Kasus [Internet]. Indonesia Emas Group; 2025 [cited 2026 Jan 12]. Available from: <https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=TIxVEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR4&dq=Validitas+konseptual+diperkuat+dengan+membandingkan+dan+mengontraskan+temuan+antarpelitian+yang+direview,+sehingga+kesimpulan+yang+dihasilkan+tidak+berga ntung+pada+satu+sumber+tunggal,+melainkan+pada+pola+temuan+yang+berulang+dan+konsisten.&ots=iAW11sNOZ&sig=f8dzGt9FW2FGnDiDp0XF8zsPXbA>
19. Urfa GA, Sari N, Nasrulloh AV. Neutron Generated during Proton Bombardment in Water Molecule. *JFF*. 2023 Mar 15;20(1):45. doi:10.20527/flux.v20i1.14684
20. Halimatussyakdiah A, Milvita D, Nazir F. Analisis Tc-99m Sestamibi Pada Perempuan Kanker Payudara Menggunakan Teknik Region of Interest (ROI) di Laboratorium In-vivo PTKMR-BATAN. *JFU*. 2021 Jan 25;9(4):545–9. doi:10.25077/jfu.9.4.545-549.2020
21. Agus NA, Holik HA, Achmad A. KEMAJUAN TERKINI DALAM RADIOFARMAKA SEBAGAI AGEN TERAPI KANKER PAYUDARA.
22. Rasyada LA, Fardela R, Elliyanti A. Optimalisasi Terapi Radioaktif Yodium (RAI) pada Kanker Tiroid: Tinjauan Literatur. *JPS*. 2025 Dec 3;27(3):1. doi:10.56064/jps.v27i3.1224
23. Ödén J, Toma-Dasu I, Witt Nyström P, Traneus E, Dasu A. Spatial correlation of linear energy transfer and relative biological effectiveness with suspected treatment-related toxicities following proton therapy for intracranial tumors. *Medical Physics*. 2020 Feb;47(2):342–51. doi:10.1002/mp.13911
24. Kruis MF. Improving radiation physics, tumor visualisation, and treatment quantification in radiotherapy with spectral or dual-energy CT. *J Applied Clin Med Phys*. 2022 Jan;23(1):e13468. doi:10.1002/acm2.13468
25. Azarkin M, Kirakosyan M, Ryabov V. Study of Nuclear Reactions in Therapy of Tumors with Proton Beams. *IJMS*. 2023 Aug 29;24(17):13400. doi:10.3390/ijms241713400
26. Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), RO-077125 Măgurele, Romania, Schubert H, Leonte R, Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), RO-077125 Măgurele, Romania, Băruță S, Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), RO-077125 Măgurele, Romania, et al. Production of medical radioisotopes via photonuclear reactions: review of candidates and opportunities for the planned radioactive ion facility at IFIN-HH. *Rom Rep Phys*. 2024 Sep 21;76(2):203–203. doi:10.59277/RomRepPhys.2024.76.203
27. Kar NR. Production and Applications of Radiopharmaceuticals: A Review. *IJPI*. 2019 Nov 19;9(2):36–42. doi:10.5530/ijpi.2019.2.8
28. Bobeica M, Niculae D, Balabanski D, Filipescu D, Gheorghe I, Ghita DG, et al. Radioisotope Production for Medical Applications at ELI-NP. Vol. 68. 2016;68:S847–83.