Optimasi Skema Proton Terapi Konvensional dan FLASH Berbasis Simulasi Monte Carlo: Kajian Radiobiologi Pembentukan Radical Yield Menggunakan TOPAS-nBio

Penelitian P2MI KK

D N Riskiana [1], M Haekal [1] F Haryanto [1], R Widita [1], S N Khotimah [1], I Arif[1].

[1] Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Abstrak

Terapi proton FLASH menawarkan potensi pengurangan toksisitas jaringan normal tanpa menurunkan efektivitas terapi, tetapi mekanisme radiokimia yang mendasarinya masih belum sepenuhnya dipahami. Penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo track-structure berbasis TOPAS-nBio untuk mengkaji pengaruh jumlah pulsa, lebar pulsa, dan interval antarpulsa terhadap pembentukan dan evolusi spesies kimia hasil radiolisis air. Analisis dilakukan terhadap spesies dominan berdasarkan perubahan nilai G. Peningkatan jumlah pulsa menurunkan yield •OH dan e^-_{aq} serta meningkatkan pembentukan H_2O_2, yang menunjukkan meningkatnya rekombinasi antarradikal. Lebar pulsa yang singkat menghasilkan deposisi energi dan pembentukan radikal secara cepat. Nilai G relatif konstan pada interval antarpulsa 1 s–10 ms, sedangkan interval 100 µs meningkatkan rekombinasi radikal dan menghasilkan G(H_2O_2) maksimum sebesar 0,795. Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan struktur temporal berkas berperan penting dalam optimasi skema penyinaran proton FLASH.

Keyword: Terapi Proton, Radiobiologi, Monte Carlo, FLASH

Pendahuluan

Terapi proton memiliki keunggulan dosimetrik melalui karakteristik puncak Bragg, yang memungkinkan deposisi dosis maksimum pada target sekaligus mengurangi paparan radiasi pada jaringan sehat. Penerapan terapi proton pada laju dosis sangat tinggi atau FLASH berpotensi menurunkan toksisitas jaringan normal tanpa mengurangi efektivitas pengendalian tumor.

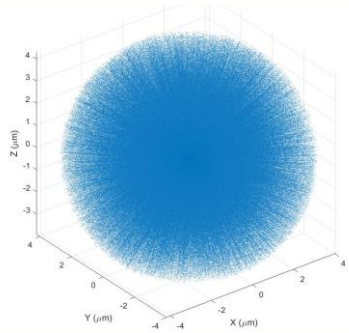
Pada kondisi FLASH, proton dihantarkan dalam pulsa berintensitas tinggi dengan interval waktu yang sangat singkat. Struktur temporal tersebut dapat meningkatkan kepadatan ionisasi, menyebabkan tumpang tindih trek, serta memengaruhi proses radiolisis air, rekombinasi radikal, dan pembentukan spesies kimia reaktif. Namun, mekanisme radiokimia yang mendasari efek FLASH proton masih belum sepenuhnya dipahami.

Penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo track-structure berbasis TOPAS-nBio untuk menganalisis pengaruh laju dosis, lebar pulsa, dan waktu antarpulsa terhadap pembentukan serta evolusi spesies kimia hasil radiolisis air. Hasil penelitian diharapkan mendukung penentuan skema penyinaran yang optimal dan pengembangan model radiobiologi terapi proton FLASH yang lebih akurat.

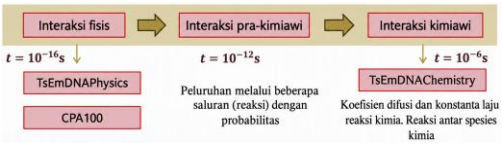
Metodologi Penelitian

Penelitian ini terdiri dari tiga buah tahap:

1. Tahapan Simulasi Monte Carlo
   Tahapan ini terdiiri dari tiga pemodelan yaitu pemodelan sumber radiasi, pemodelan pemberian dosis seperti pada Gambar 1 dan pemodelan interaski yang ditunjukkan pada Gambar 2.
2. Tahapan Pengelolaan Data
   Data hasil dari simulasi diolah dalam format CSV untuk menganalisis distribusi spasial dan evolusi temporal empat spesies kimia dominan berdasarkan nilai G-value. Analisis dilakukan untuk membandingkan skenario penyinaran proton konvensional dan FLASH.
2. Tahapan Analisa Temporal Spesies Kimia
   Analisis dilakukan untuk membandingkan pengaruh variasi struktur temporal berkas, meliputi lebar pulsa, laju dosis total, dosis per pulsa, dan waktu antarpulsa.



Gambar 1. Model sumber radiasi

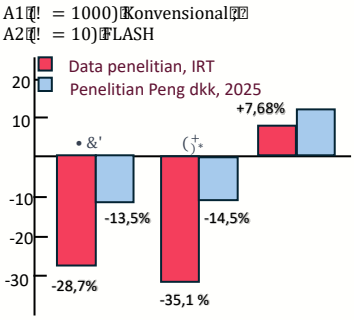


Gambar 2. Interaksi yang dimodelkan

Hasil & Pembahasan

Variasi Jumlah Pulsa

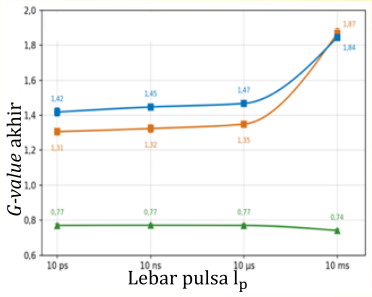
Penurunan yield radikal •OH dan e^-_{aq}, bersamaan dengan peningkatan yield produk molekuler stabil H_2O_2, mengindikasikan peningkatan rekombinasi antarradikal. (Gambar 3)



Gambar 3. Pengaruh jumlah pulsa

Variasi Lebar Pulsa

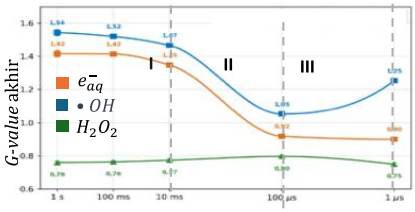
Laju dosis per-pulsa tinggi terjadi peningkatan deposisi energi diawal cukup signifikan, menghasilkan radikal dengan jumlah yang besar pada waktu yang sangat cepat.. (Gambar 4)



Gambar 4. Pengaruh lebar pulsa

Variasi Interval Pulsa

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa perubahan nilai G terhadap variasi interval pulsa (Δt) tidak bersifat seragam (Gambar 5). Pada interval Δt = 1 s–10 ms, nilai G relatif konstan karena radikal telah habis sebelum pulsa berikutnya diberikan sehingga kondisinya mendekati iradiasi konvensional. Ketika interval pulsa diperkecil menjadi Δt = 100 µs, terjadi rekombinasi radikal dengan nilai G(•OH) dan G(eaq−_{aq}^{-}aq−) masing-masing sebesar 1,05 dan 0,92, sedangkan G(H_2O_2) mencapai nilai maksimum sebesar 0,795. Pada interval yang lebih pendek, yaitu Δt = 1 µs, total waktu iradiasi sekitar 19 µs, jauh lebih singkat daripada waktu hidup radikal •OH, τ(•OH), sebesar 10 ms.



Gambar 5. Pengaruh Interval lebar pulsa

Simpulan

Simulasi TOPAS-nBio menunjukkan bahwa struktur temporal berkas proton FLASH secara signifikan memengaruhi kinetika radiolisis air, dengan peningkatan jumlah pulsa dan pemendekan interval antarpulsa memperkuat rekombinasi radikal. Interval antarpulsa 100 µs menghasilkan G(H_2O_2) maksimum sebesar 0,795, sehingga optimasi parameter pulsa menjadi aspek penting dalam pemodelan respons radiokimia proton FLASH.