

Faktor Koreksi *Ionization Chamber* pada Dosimetri Berkas Elektron: Kualitas Berkas, Polaritas, dan Rekombinasi Ion di Berbagai Kondisi Pengukuran

Falah Putra Caesarianto^{1*}, Bernike Hernita Sofiana¹, I Wayan Krisnanda¹

¹Universitas Indonesia, Indonesia

*falah.putra51@ui.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 08 June 2026

Revised 20 June 2026

Accepted 08 July 2026

Available online 24 July 2026

Keywords:

Ultra-high dose rate; FLASH radiotherapy; dose per pulse; small-field dosimetry; ionization chamber design.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Copyright © 2025 by Author. Published by Physical Science Indonesia

ABSTRACT

Ionization chamber dosimetry in electron beam radiotherapy required accurate correction for beam quality, polarity effects, and ion recombination. This review examined current evidence on these correction factors under conventional, high dose rate electron, ultra-high dose rate, extended source-to-surface distance, and small-field conditions, with emphasis on recent updates to international electron dosimetry formalisms. Updated Monte Carlo calculations for the beam quality correction factor produced values approximately 0.5% lower than older protocol tabulations, while multicenter experimental data showed that inter-institutional variability remained within the $\pm 2\%$ clinical tolerance. For the polarity correction factor, dose per pulse, electrode spacing, field size, and cable geometry were identified as the main determinants, with cable irradiation producing large apparent polarity corrections in large-field and high dose rate electron beams. For the ion recombination correction factor, conventional two-voltage analysis was reliable only up to approximately 10 mGy per pulse; above this range, empirical logistic models provided more accurate correction estimates.

Sub-millimeter electrode spacing and high electric field strength were the most important chamber design parameters for ultra-high dose rate dosimetry. Overall, correction factor uncertainties remained controlled under conventional reference conditions but increased substantially under high dose-per-pulse and non-reference geometries, which current protocols did not adequately cover. These findings supported the need for dedicated dosimetry protocols for high dose rate electron, ultra-high dose rate, extended source-to-surface distance, and small-field electron beam modalities.

ABSTRAK

Dosimetri *ionization chamber* pada radioterapi berkas elektron memerlukan koreksi yang akurat terhadap kualitas berkas, efek polaritas, dan rekombinasi ion. Tinjauan ini telah mengkaji bukti terkini mengenai faktor-faktor tersebut pada kondisi konvensional, *high dose rate electron*, *ultra-high dose rate*, *extended source-to-surface distance*, dan lapangan kecil, dengan penekanan pada pembaruan terbaru dalam formalisme dosimetri elektron internasional. Perhitungan Monte Carlo terbaru untuk faktor koreksi kualitas berkas menghasilkan nilai sekitar 0,5% lebih rendah dibandingkan tabulasi protokol lama, sedangkan data eksperimental multisenter menunjukkan bahwa variabilitas antar institusi tetap berada dalam batas toleransi klinis $\pm 2\%$. Untuk faktor koreksi polaritas, *dose per pulse*, jarak elektroda, ukuran lapangan, dan geometri kabel teridentifikasi sebagai penentu utama, dengan iradiasi kabel menghasilkan koreksi polaritas semu yang besar pada berkas elektron lapangan besar dan laju dosis tinggi. Untuk faktor rekombinasi ion, metode *two-voltage analysis* konvensional hanya andal sekitar 10 mGy per pulsa; di atas rentang tersebut, model logistik empiris memberikan estimasi koreksi yang lebih akurat. Jarak elektroda sub-milimeter dan kuat medan listrik tinggi merupakan parameter desain *chamber* yang paling penting untuk dosimetri *ultra-high dose rate*. Secara keseluruhan, ketidakpastian faktor koreksi tetap terkendali pada kondisi referensi konvensional, tetapi meningkat secara substansial pada geometri non-referensi dan *dose-per-pulse* tinggi yang belum tercakup secara memadai dalam protokol saat ini. Temuan ini mendukung perlunya protokol dosimetri khusus untuk modalitas berkas elektron *high dose rate electron*, *ultra-high dose rate*, *extended source-to-surface distance*, dan lapangan kecil.

1. PENDAHULUAN

Dalam radioterapi berkas elektron klinis, akurasi dosimetri merupakan aspek yang fundamental, karena ketidakpastian dosis yang diberikan dapat berdampak langsung pada efektivitas terapi. *Ionization chamber* merupakan salah satu detektor yang dapat digunakan dalam dosimetri berkas elektron. Terdapat beberapa jenis *ionization chamber* yang dapat digunakan untuk kalibrasi berkas elektron yaitu *plane-parallel ionization chamber* dan *cylindrical ionization chamber*. *Plane-parallel ionization chamber* dapat digunakan sebagai detektor pada seluruh energi elektron dan wajib digunakan untuk energi elektron di bawah 8 MeV. Sementara itu, *cylindrical ionization chamber* dapat digunakan sebagai detektor pada berkas elektron dengan energi di atas ~9 MeV (IAEA, 2024).

Salah satu kelemahan *ionization chamber* dalam penggunaannya sebagai detektor adalah adanya ketergantungan faktor konversi *ionization-to-dose*, seperti rasio *stopping power* dan faktor perturbasi, pada energi elektron dan kedalaman dalam *phantom* (Khan, 1991). Faktor perturbasi *ionization chamber* p_{ch} merupakan hasil dari beberapa faktor koreksi efek-efek berbeda yang masing-masing mengoreksi perturbasi kecil dalam penggunaan *ionization chamber* sebagai detektor dosimetri berkas yaitu p_{cav} , p_{cel} , p_{dis} , dan p_{wall} . Faktor konversi *ionization-to-dose* yang terdiri atas *stopping power* tersebut tergabung dalam suatu faktor koreksi kualitas berkas k_{Q,Q_0} yang diperhitungkan dalam penentuan dosis serap air (IAEA, 2024).

Selain faktor koreksi kualitas berkas, terdapat faktor-faktor lain yang terkandung dalam hasil bacaan *ionization chamber*. Beberapa faktor koreksi tersebut antara lain faktor koreksi tekanan, temperatur, dan kelembapan k_{TP} ; faktor kalibrasi elektrometer k_{elec} ; faktor koreksi efek polaritas k_{pol} ; dan faktor koreksi rekombinasi ion k_s . Hasil bacaan *ionization chamber* perlu dikoreksi menggunakan faktor koreksi sebelum dimasukkan dalam perhitungan dosis serap air (IAEA, 2024).

Pada kasus non referensi seperti pada kasus berkas elektron lapangan kecil, terjadi kehilangan *Lateral Charged Particle Equilibrium* (LCPE) dan efek *volume averaging* akibat volume detektor yang terlalu besar dibandingkan ukuran lapangan berkas elektron. Hingga saat ini, belum ada protokol resmi yang merekomendasikan protokol khusus untuk dosimetri berkas elektron lapangan kecil. Namun, beberapa penelitian telah dilakukan untuk menginvestigasi karakteristik dosimetri berkas elektron lapangan kecil seperti pengaruh ukuran lapangan berkas elektron pada kurva *Percentage Depth Dose* (PDD) dan *Output Factor* (OF). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan ukuran lapangan perlu diperhitungkan dalam faktor koreksi kualitas berkas dalam dosimetri berkas elektron lapangan kecil.

Perkembangan protokol dosimetri internasional, terutama melalui publikasi IAEA TRS-398 Rev. 1 (IAEA, 2024) dan AAPM WGTG51 Report 385 (Muir et al., 2024), telah memperbarui data faktor koreksi dan formalisme dosimetri berkas elektron secara komprehensif. Pada saat yang sama, berkembangnya modalitas elektron laju dosis tinggi, termasuk radioterapi FLASH, menghadirkan tantangan dosimetri baru yang belum sepenuhnya diakomodasi oleh protokol yang tersedia. Tinjauan literatur ini membahas tentang faktor koreksi kualitas berkas k_{Q,Q_0} pada berkas elektron, faktor koreksi efek polaritas k_{pol} , faktor koreksi rekombinasi ion k_s , faktor koreksi kualitas berkas yang memperhitungkan perbedaan ukuran lapangan, serta ketidakpastian gabungan dari seluruh faktor koreksi pada dosimetri berkas elektron.

2. FAKTOR KOREKSI KUALITAS BERKAS (k_{Q,Q_0}) PADA BERKAS ELEKTRON

2.1. Definisi dan Formalisme

Faktor koreksi kualitas berkas dinotasikan sebagai k_{Q,Q_0} merupakan salah satu faktor koreksi terpenting dalam dosimetri referensi berkas elektron. Faktor ini diturunkan dari teori kavitas Bragg-Gray dan menggambarkan rasio respons *ionization chamber* pada kualitas berkas pengguna (Q) terhadap kualitas berkas kalibrasi (Q_0), dimana kualitas berkas kalibrasi umumnya adalah berkas foton Co^{60} (Almond et al., 1999; IAEA, 2000).

Formalisme dasar penentuan dosis serap ke air dalam protokol dosimetri modern dinyatakan sebagai berikut.

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0}, \quad (1)$$

dengan M_Q merupakan bacaan elektrometer yang telah dikoreksi terhadap suhu dan tekanan, kalibrasi elektrometer, efek polaritas dan rekombinasi ion. N_{D,w,Q_0} adalah faktor kalibrasi dalam satuan dosis yang diserap oleh air untuk dosimeter pada kualitas referensi Q_0 . Sedangkan k_{Q,Q_0} adalah faktor spesifik ruang yang memperhitungkan selisih antara kualitas berkas referensi Q_0 dan kualitas berkas actual Q (IAEA, 2000).

Derivasi teoritis k_{Q,Q_0} berakar pada formulasi Spencer-Attix dari teori Bragg-Gray Cavity yang memberikan kerangka fisik yang menghubungkan dosis yang disimpan di rongga berisi gas dari ruang ionisasi dengan dosis

dalam media air di sekitarnya. Kondisi Bragg-Gray mengharuskan dimensi rongga kecil relatif terhadap kisaran partikel bermuatan yang melintasinya, memastikan bahwa spektrum fluensi elektron di dalam rongga tidak terganggu oleh keberadaan rongga itu sendiri (McEwen et al., 2014). Dalam kondisi ini, respons ruang diatur oleh rasio daya penghentian air ke udara Spencer-Attix ($s_{w,air}$) dan serangkaian faktor koreksi gangguan. Secara matematis k_{Q,Q_0} dinyatakan sebagai berikut (IAEA, 2000; B. R. Muir & Rogers, 2014).

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{w,air} \cdot p_{cav} \cdot p_{dis} \cdot p_{wall} \cdot p_{cel})_Q}{(s_{w,air} \cdot p_{cav} \cdot p_{dis} \cdot p_{wall} \cdot p_{cel})_{Q_0}}, \quad (2)$$

dengan p_{cav} adalah faktor gangguan rongga, p_{dis} adalah faktor gangguan perpindahan, p_{wall} adalah faktor gangguan dinding, dan p_{cel} adalah faktor gangguan elektroda pusat (IAEA, 2000). Untuk *plane-parallel* dalam berkas elektron, nilai p_{cel} umumnya sama dengan satu dan p_{dis} dapat diabaikan. Namun, nilai p_{wall} dapat berbeda secara signifikan dari satu, bergantung pada desain ruang ionisasi dan energi berkas. Perbedaan ini terutama terlihat pada energi rendah, ketika hamburan balik elektron dari dinding ruang ionisasi menjadi lebih signifikan (Zink & Wulff, 2008).

Penggunaan R_{50} sebagai penentu tunggal kualitas berkas pertama kali diusulkan oleh Burns et al. melalui studi Monte Carlo komprehensif terhadap 24 berkas elektron klinis. Studi tersebut menunjukkan bahwa R_{50} mampu merepresentasikan rasio *stopping power* Spencer-Attix secara unik dan konsisten pada seluruh rentang energi elektron terapeutik (Burns et al., 1998).

Kedalaman referensi pengukuran ditetapkan menggunakan formula berikut.

$$z_{ref} = 0,6R_{50} - 0,1, \quad (3)$$

maka rasio *stopping power* pada kedalaman referensi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$s_{w,air} = 1,2534 - 0,1487 (R_{50})^{0,2144}, \quad (4)$$

dengan *root mean square deviation* hanya sebesar 0,16% terhadap data hasil simulasi Monte Carlo (Burns et al., 1998). Berdasarkan hasil tersebut, protokol IAEA TRS-398 dan AAPM TG-51 kemudian mengadopsi R_{50} sebagai parameter standar kualitas berkas elektron dan z_{ref} sebagai kedalaman referensi dosimetri (Almond et al., 1999; IAEA, 2000).

2.2. Perkembangan Historis Data k_{Q,Q_0}

Dataset eksperimental dan Monte Carlo yang dihasilkan sebelum tahun 2000 menjadi basis utama penyusunan tabel k_{Q,Q_0} dalam protokol IAEA TRS-398. Data-data ini dikumpulkan dari berbagai laboratorium standar primer dan sekunder di seluruh dunia menggunakan *chamber* dari berbagai produsen dengan rentang energi berkas elektron 4 – 22 MeV. Pada periode tersebut, simulasi Monte Carlo mulai digunakan untuk membantu evaluasi faktor perturbasi dan stopping power ratio, meskipun masih terbatas oleh kemampuan komputasi dan model geometri *chamber* yang relatif sederhana (IAEA, 2000).

Nilai tabulasi dalam TRS-398 memiliki beberapa keterbatasan yang kemudian diakui secara eksplisit, terutama untuk jenis *chamber* tertentu dan pada rentang energi elektron tinggi. Keterbatasan tersebut berasal dari kurangnya data eksperimental untuk validasi, pemodelan geometri *chamber* yang disederhanakan, serta variasi metodologi antar laboratorium. Selain itu, data *stopping power* dan *perturbation correction* yang digunakan masih mengacu pada basis data lama sebelum publikasi ICRU Report 90. Alissa et al. (2024) menunjukkan bahwa nilai hasil perhitungan modern cenderung lebih rendah dibandingkan tabel TRS-398 dengan perbedaan hingga sekitar 0,5%, sejalan dengan evaluasi sebelumnya yang menunjukkan adanya ketidakpastian sistematis pada faktor kualitas berkas elektron (Alissa et al., 2024; IAEA, 2000).

Perkembangan nilai k_{Q,Q_0} dalam dosimetri elektron tidak berlangsung secara linear, melainkan melalui serangkaian revisi yang didorong oleh kemajuan komputasi Monte Carlo dan ketersediaan data eksperimental yang lebih akurat. Tabel 1 merangkum tonggak utama perkembangan protokol dosimetri elektron.

Tonggak penting berikutnya adalah publikasi AAPM TG-51 versi asli tahun 1999, yang menggunakan faktor k_{R50} berkorelasi langsung terhadap parameter kualitas berkas R_{50} dan membagi faktor konversi menjadi beberapa komponen terpisah. Pendekatan ini kemudian menjadi dasar pengembangan metode modifikasi pada penelitian Pawiro et al. (2022), yang menerapkan *cylindrical chamber* untuk seluruh rentang energi elektron dan menggunakan faktor kualitas berkas yang diperbarui. Pendekatan tersebut menghasilkan rasio dosis antara protokol termodifikasi dan TRS-398 sebesar 1,002 pada Elekta Synergy Platform dan 1,000 pada Versa HD untuk *cylindrical chamber* (Pawiro et al., 2022).

Perkembangan berikutnya mengarah pada revisi besar protokol dosimetri internasional melalui IAEA TRS-398 Rev.1 tahun 2024. Revisi ini memperbarui faktor kualitas berkas menggunakan kombinasi data Monte Carlo modern dan pengukuran eksperimental terkini dengan basis data stopping power terbaru dari ICRU Report 90.

Selain itu, revisi tersebut memperluas jumlah *chamber* yang tersedia, memperbaiki model geometri *chamber*, serta mengintegrasikan beberapa koreksi gradien dosis yang sebelumnya diperlakukan terpisah. Pembaruan ini menyebabkan perubahan nilai k_Q , terutama pada *cylindrical chamber* dan energi elektron tertentu (IAEA, 2024).

Tabel 1. Perkembangan protokol dosimetri elektron

Tahun	Protokol/Studi	Metode	Perubahan Utama terhadap k_{Q,Q_0}	Referensi
1999	AAPM TG-51	Eksperimental berbasis $k_{R_{50}}$	Protokol pertama berbasis <i>absorbed dose to water</i> ; faktor $k_{R_{50}}$ berkorelasi langsung dengan R_{50} Tabel k_{Q,Q_0} pertama	Almond et al. (1999)
2000	IAEA TRS-398	Eksperimental dan Monte Carlo	berbasis <i>absorbed dose to water</i> ; adopsi R_{50} dan z_{ref} sebagai standar Perhitungan k_{Q,Q_0}	IAEA (2000)
2014	Muir & Rogers	Monte Carlo (EGSnrc)	berbasis Monte Carlo modern untuk banyak <i>chamber</i> ; RMSD 0,15% untuk <i>cylindrical</i> menjadi basis data Adendum 2024 k_Q untuk <i>chamber</i>	Muir & Rogers (2014)
2024	Alissa et al.	Monte Carlo (EGSnrc)	baru; RMSD 0,0016 – 0,0024; ~0,5% lebih rendah dari TRS-398 Pembaruan menyeluruh k_{Q,Q_0} ;	Alissa et al. (2024)
2024	IAEA TRS-398 Rev.1	Monte Carlo Modern dan ICRU Report 90	perluasan daftar <i>chamber</i> Adendum TG-51 untuk elektron;	IAEA (2024)
2024	AAPM WGTG51 Report 385	Monte Carlo Modern dan eksperimental	adopsi data Muir & Rogers	Muir et al. (2024)

Sejalan dengan perkembangan tersebut, adendum TG-51 tahun 2024 melalui Laporan WGTG51 Report 385 juga melakukan pembaruan signifikan terhadap faktor kualitas berkas elektron dengan mengintegrasikan data Monte Carlo dan pengukuran eksperimental modern. Mahfirotin et al. (2023) menunjukkan bahwa faktor kualitas berkas *cylindrical chamber* yang ditentukan menggunakan metode kalibrasi termodifikasi menghasilkan rasio 0,994–1,003 terhadap TRS-398 dan 1,000–1,010 terhadap TG-51. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan termodifikasi memiliki kesesuaian yang baik terhadap protokol lama maupun protokol yang telah diperbarui, sekaligus menegaskan pentingnya evaluasi ulang faktor kualitas berkas berdasarkan data Monte Carlo generasi terbaru (Mahfirotin et al., 2023; B. Muir et al., 2024).

2.3. Perhitungan Monte Carlo k_{Q,Q_0}

Metode Monte Carlo telah menjadi alat utama dalam menghitung nilai k_{Q,Q_0} secara teoritis. Kode Monte Carlo yang paling banyak digunakan meliputi EGSnrc, PENELOPE, dan GEANT4. EGSnrc secara khusus dikenal memiliki akurasi tinggi dalam simulasi transpor elektron dan foton pada rentang energi yang relevan secara klinis (Alissa et al., 2024).

Pilihan kode Monte Carlo berpengaruh terhadap akurasi pemodelan geometri *chamber* dan transport elektron pada energi klinis. Karakteristik utama kode Monte Carlo yang digunakan dalam perhitungan k_{Q,Q_0} berkas elektron beserta *chamber* dimodelkan dalam studi-studi yang dikaji ditunjukkan pada Tabel 2.

Pemodelan geometri *chamber* secara akurat merupakan aspek kritis dan sumber ketidakpastian penting. Detail konstruksi seperti dimensi elektroda, komposisi bahan dinding, dan geometri volume sensitif harus

direpresentasikan dengan tepat dalam model simulasi. Mahfirotin et al. (2023) menggunakan nilai k'_Q berbasis Monte Carlo yang diperbarui, yang mempertimbangkan geometri aktual *chamber* PTW 30013, IBA FC65-G, IBA FC65-P dan PTW 34045, PTW 34001, IBA PPC-40, memberikan dasar fisika yang lebih kuat dibandingkan nilai tabulasi lama (Alissa et al., 2024; Mahfirotin et al., 2023).

Tabel 2. Karakteristik kode Monte Carlo yang digunakan dalam perhitungan k_{Q,Q_0} berkas elektron

Kode Monte Carlo	Chamber yang Dimodelkan	Rentang energi (MeV)	RMSD fitting (%)	Keunggulan utama	Referensi
EGSnrc	PTW 30013, IBA FC65-G, IBA FC65-P, PTW 34045, PTW 34001, IBA PPC-40	4 – 22	0,15	Akurasi tinggi transpor elektron; geometri <i>chamber</i> aktual termodelkan; menjadi basis data Adendum TG-51 2024 Pembaruan k_Q untuk <i>chamber</i> generasi baru; nilai $\sim 0,5\%$ lebih rendah dari TRS-398	Muir & Rogers (2014)
EGSnrc	SNC600c, SNC125c, SNC350p	5 – 18	0,16 – 0,24	Validasi silang dengan EGSnrc; konsistensi $\sim 0,5\%$ pada kondisi referensi	Alissa et al. (2024)
PENELOPE	Berbagai <i>cylindrical</i> dan <i>plane-parallel chamber</i>	4 – 22	-		Sempau et al. (2004); Erazo et al. (2017)

Dua kode Monte Carlo utama yang digunakan dalam perhitungan k_{Q,Q_0} berkas elektron adalah EGSnrc dan PENELOPE. Muir & Rogers (2014) menggunakan EGSnrc untuk menghitung k_{Q,Q_0} secara sistematis untuk berbagai jenis *cylindrical* dan *plane-parallel chamber* pada rentang energi 4 – 22 MeV menghasilkan RMSD kurva *fitting* sebesar 0,15%, data inilah yang kemudian diadopsi sebagai basis AAPM WGTG51 Report 385 (2024). Sejalan dengan itu, Sempau et al. (2004) menggunakan sistem PENELOPE untuk menghitung k_{Q,Q_0} pada tiga *plane-parallel chamber* dalam rentang energi elektron 4 – 20 MeV dan menemukan konsistensi dengan nilai TRS-398 dalam batas $\sim 0,5\%$. Hasil ini kemudian dikonfirmasi oleh Erazo et al. (2017) yang menggunakan PENELOPE untuk *cylindrical chamber* NE2571, NE2571A, dan NE2581A pada berkas elektron 6–22 MeV, dengan hasil yang konsisten terhadap perhitungan EGSnrc oleh Muir & Rogers (2014) (Erazo et al., 2017; Sempau et al., 2004).

Studi kunci oleh Alissa et al. (2024) menghitung faktor k_Q untuk tiga ionization *chamber* (SNC600c, SNC125c, dan SNC350p) menggunakan EGSnrc dalam rentang 5–18 MeV, menghasilkan kurva fitting dengan root mean square deviation antara 0,0016 dan 0,0024. Hasil ini memberikan data yang diperbarui untuk protokol TRS-398 dan TG-51, sejalan dengan kebutuhan yang diidentifikasi dalam studi multisenter Mahfirotin et al. (2023) akan nilai k_{Q,Q_0} yang lebih akurat (Alissa et al., 2024).

Tantangan dalam perhitungan Monte Carlo meliputi ketidakpastian data penampang lintang interaksi elektron pada energi rendah, sulitnya memverifikasi detail geometri internal *chamber* secara independen, dan kebutuhan sumber daya komputasi yang besar. Meskipun demikian, kesepakatan antara kode Monte Carlo yang berbeda umumnya baik dalam batas $\sim 0,5\%$ untuk kondisi referensi. Mahfirotin et al. (2023) mengonfirmasi bahwa penggunaan nilai k'_Q berbasis Monte Carlo yang diperbarui menghasilkan konsistensi yang lebih baik antarinstansi dibandingkan dengan penggunaan nilai tabulasi TRS-398 konvensional (Alissa et al., 2024; Mahfirotin et al., 2023).

2.4. Pengukuran Eksperimental k_{Q,Q_0}

Standar primer dosis serap ke air menjadi acuan tertinggi dalam hierarki metrologi radiasi untuk menentukan nilai k_{Q,Q_0} secara eksperimental. Dua pendekatan utama yang digunakan adalah kalorimetri grafit dan kalorimetri air, keduanya mengukur dosis serap secara absolut tanpa memerlukan faktor konversi tambahan. Kesepakatan antara hasil kalorimetri dan nilai yang dihitung menggunakan Monte Carlo secara umum berada

dalam 0,5 – 1% untuk berkas elektron pada kondisi referensi, memberikan fondasi kepercayaan yang kuat terhadap keandalan metode ini (IAEA, 2000).

Dalam konteks klinis, Mahfirotin et al. (2023) melakukan verifikasi eksperimental secara menyeluruh di tujuh institusi radioterapi di Indonesia menggunakan *cylindrical* dan *plane-parallel chamber* pada linac Elekta dan Varian. Studi ini membandingkan pembacaan *chamber* terkoreksi M_Q dari tiga protokol yaitu *modified calibration*, TRS-398, dan TG-51 pada berkas elektron 4 – 22 MeV di bawah kondisi referensi standar. Dengan membandingkan ketiga protokol secara langsung, studi ini sekaligus berfungsi sebagai validasi silang k_{Q,Q_0} dalam pengaturan klinis nyata yang beragam (Mahfirotin et al., 2023).

Hasil eksperimental menunjukkan bahwa rasio faktor konversi kualitas berkas antara *modified calibration* dan TRS-398 berkisar antara 0,994 – 1,003 untuk *cylindrical chamber* dan 0,986 – 1,009 untuk *plane-parallel*, sedangkan rasio antara *modified calibration* dan TG-51 berkisar antara 1,000 – 1,010 untuk *cylindrical chamber* dan 0,993 – 1,021 untuk *plane-parallel* (Mahfirotin et al., 2023).

Berdasarkan analisis ketidakpastian, kontribusi terbesar berasal dari pemodelan geometri *chamber* dalam perhitungan Monte Carlo untuk koreksi perturbasi, diikuti oleh ketidakpastian kalibrasi standar dan variasi teknik pengukuran antar institusi. Pawiro et al. (2022) sebagai studi pendahulu langsung melaporkan deviasi standar rata-rata dosis per monitor unit antar jenis *chamber* pada linac Elekta sebesar 0,5% dan 0,4%, keduanya masih jauh di bawah batas toleransi $\pm 2\%$ yang disyaratkan TRS-398, mengonfirmasi bahwa pendekatan kalibrasi termodifikasi layak diterapkan secara klinis (Mahfirotin et al., 2023; Pawiro et al., 2022).

2.5. Variabilitas Multisenter dalam Data k_{Q,Q_0}

Variabilitas nilai k_{Q,Q_0} yang diamati antar institusi merupakan fenomena yang telah terdokumentasi dengan baik. Studi Mahfirotin et al. (2023) memberikan kontribusi penting dan kontekstual bagi topik ini dengan melakukan studi multisenter di tujuh pusat radioterapi di Indonesia menggunakan linac Elekta dan Varian dengan energi 4–22 MeV merupakan salah satu studi multisenter dosimetri elektron yang paling komprehensif di Asia Tenggara (Mahfirotin et al., 2023).

Sumber variabilitas antar institusi dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori. Pertama, perbedaan jenis dan model akselerator: studi Mahfirotin et al. (2023) secara eksplisit membandingkan linac Elekta dan Varian, dan mengamati bahwa meskipun kedua platform berada dalam batas toleransi, terdapat perbedaan sistematis kecil dalam nilai k_{Q,Q_0} yang terukur. Kedua, pemilihan jenis *chamber*: studi ini menggunakan *cylindrical chamber* (PTW 30013, IBA FC65-G, IBA FC65-P) dan *plane-parallel* (PTW 34045, PTW 34001, IBA PPC-40), dan menemukan bahwa variabilitas untuk *plane-parallel* (0,981 – 1,019) sedikit lebih besar dibandingkan *cylindrical chamber* (0,980 – 1,014) dalam rasio dosis per MU antara *modified calibration* terhadap TRS-398 (Mahfirotin et al., 2023).

Temuan penting Mahfirotin et al. (2023) berkaitan dengan penggunaan *cylindrical chamber* untuk semua energi berkas elektron. Studi ini mendukung argumen bahwa *cylindrical chamber* yang selama ini dibatasi penggunaannya pada energi tinggi karena faktor perturbasi yang lebih besar dapat digunakan secara efektif pada semua rentang energi klinis jika nilai k_{Q,Q_0} yang diperbarui berdasarkan Monte Carlo digunakan. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa variabilitas koreksi perturbasi *cylindrical chamber* hanya 0,4% dan tidak berbeda secara signifikan dari *plane-parallel* dengan spesifikasi yang sama, serta stabilitas jangka panjang *cylindrical chamber* yang lebih unggul ($< 0,15\%$) dibandingkan *plane-parallel* ($> 0,2\%$) (Mahfirotin et al., 2023; Pawiro et al., 2022).

Implikasi temuan multisenter ini sangat signifikan bagi harmonisasi protokol, khususnya di negara berkembang. Mahfirotin et al. (2023) menunjukkan bahwa pendekatan *modified calibration* yang lebih sederhana secara prosedural karena hanya menggunakan satu jenis *chamber* memberikan hasil yang sebanding dengan TRS-398 dan TG-51 dalam batas toleransi klinis. Hal ini berpotensi meningkatkan konsistensi dosimetri antar institusi, terutama di pusat radioterapi yang memiliki keterbatasan sumber daya dan ketersediaan *plane-parallel* yang lebih mahal dan kurang stabil (Mahfirotin et al., 2023).

Program audit dosimetri nasional dan interkomparasi internasional yang dilakukan IAEA dan IPEM telah mengungkap bahwa deviasi dosimetri elektron umumnya lebih besar dibandingkan dosimetri foton, dengan sebagian besar berada dalam rentang $\pm 2 - 3\%$. Studi Mahfirotin et al. (2023) mengonfirmasi temuan ini dalam konteks Indonesia, sekaligus menawarkan solusi praktis melalui penerapan k'_Q berbasis Monte Carlo yang diperbarui sebagai upaya mengurangi variabilitas sistematis yang bersumber dari penggunaan nilai tabulasi lama (IAEA, 2000; Mahfirotin et al., 2023).

3. FAKTOR KOREKSI POLARITAS (k_{pol}) PADA BERKAS ELEKTRON

3.1. Asal-Usul Fisis Efek Polaritas

Efek polaritas menjelaskan perbedaan besar sinyal listrik yang dihasilkan oleh *ionization chamber* ketika tegangan bias dibalik (Butler & Healy, 2025). Pada berkas elektron, efek ini umumnya lebih menonjol dibanding berkas foton (Muir et al., 2024). Meskipun TRS-398 menyatakan bahwa efek polaritas biasanya kecil pada berkas foton (<0,2%), efek ini dapat menjadi signifikan pada berkas partikel bermuatan, khususnya elektron, dan merekomendasikan evaluasi sistematis di semua energi selama komisioning *chamber* (IAEA, 2024). Dengan demikian, koreksi polaritas bukan hanya tahapan prosedural dalam dosimetri elektron tetapi juga merupakan sumber ketidakpastian yang bergantung pada berkas dan *chamber*.

Pembacaan elektrometer total dari sebuah *ionization chamber* dapat didekomposisi menjadi dua komponen, komponen yang bergantung pada bias yang berasal dari ionisasi di dalam volume aktif (M_{ion}) dan komponen yang tidak bergantung pada bias yang timbul dari arus yang diinduksi radiasi pada komponen *chamber* di luar volume sensitif, termasuk *stem*, konektor, dan kabel (M_C) (Butler & Healy, 2025). Dekomposisi ini dinyatakan sebagai:

$$M^+ = M_{ion} + M_C \# (5)$$

dan

$$M^- = -M_{ion} + M_C \# (6)$$

Kemudian, melalui aritmetika sederhana diperoleh:

$$M_{ion} = \frac{(M^+ - M^-)}{2} \# (7)$$

dan

$$M_C = \frac{(M^+ + M^-)}{2} \# (8)$$

Butler dan Healy (2025) mengaitkan komponen yang tidak bergantung pada bias terutama dengan iradiasi kabel oleh radiasi hambur. Pengukuran ketergantungan ukuran lapangan yang dilakukan menunjukkan bahwa sinyal yang hanya berasal dari kabel meningkat secara monoton dengan ukuran lapangan sambil tetap sepenuhnya tidak bergantung pada bias, dengan arus yang diinduksi kabel berkisar dari 0,5 pA dalam kondisi tipikal hingga setinggi 7 pA pada lapangan besar. Temuan ini mengindikasikan bahwa efek polaritas yang tampak mungkin berasal dari luar *ionization cavity* itu sendiri.

Mekanisme fisis yang mendasari M_C melibatkan ketidakseimbangan antara elektron sekunder yang dihasilkan dan dihentikan di dalam komponen *chamber*, termasuk elektroda pengumpul, *stem*, dan kabel, seperti yang dijelaskan Looe et al. (2018, sebagaimana dikutip dalam Butler & Healy, 2025). Geometri *chamber* lebih lanjut memodulasi kontribusi ini, volume sensitif yang lebih kecil menghasilkan arus ionisasi yang lebih lemah, membuat sinyal kabel secara proporsional lebih signifikan (Butler & Healy, 2025). Liu et al. (2024a) juga mengidentifikasi mekanisme yang bergantung pada geometri, melaporkan bahwa *cylindrical chamber* mengalami efek polaritas yang bergantung pada tegangan yang timbul dari medan listrik yang tidak homogen di dalam *air cavity*, sedangkan *microchamber* menunjukkan efek polaritas yang terkait dengan arus Compton yang diinduksi di *stem*. Studi-studi ini menunjukkan bahwa efek polaritas tidak dapat dikaitkan dengan satu mekanisme tunggal, tetapi mencerminkan interaksi antara desain *chamber*, iradiasi *extracamerai*, dan kondisi medan listrik.

Dalam kondisi *ultra-high dose-per-pulse* (UHDPP), mekanisme tambahan telah diusulkan, akumulasi *space-charge* di dalam volume udara dapat secara sementara mendistorsi medan listrik internal, menghasilkan komponen polaritas yang bergantung pada *dose-per-pulse* (DPP) (Poppinga et al., 2021). Akan tetapi, mekanisme ini dijelaskan sebagai hipotesis pada saat publikasi dan memerlukan validasi eksperimen lebih lanjut. Bourgouin et al. (2023) kemudian mengkonfirmasi bahwa teori saat ini tidak sepenuhnya menjelaskan efek polaritas yang diamati dalam berkas elektron UHDPP dan merekomendasikan investigasi sistematis lebih lanjut. Ketidakpastian ini sangat relevan karena dosimetri elektron beralih dari kondisi referensi konvensional menuju area pemanfaatan DPP tinggi.

Untuk *plane-parallel chamber*, TRS-398 mencatat bahwa efek polaritas umumnya lebih menonjol pada energi elektron rendah, meskipun untuk jenis *chamber* tertentu efek tersebut meningkat seiring dengan energi, sehingga perlu dievaluasi di seluruh rentang energi klinis (IAEA, 2024). TG-51 Addendum mencatat bahwa koreksi polaritas pada berkas elektron dapat mencapai 2% dan secara eksplisit menyatakan bahwa spesifikasi berkas foton tidak berlaku untuk dosimetri berkas elektron (Muir et al., 2024). Pernyataan protokol-protokol ini memperkuat perlunya pengukuran langsung dari k_{pol} di kondisi kualitas berkas, jenis *chamber*, dan geometri pengukuran spesifik yang digunakan.

3.2. Metode Pengukuran dan Rekomendasi Protokol

Protokol dosimetri referensi utama menetapkan faktor koreksi polaritas multiplikatif yang didefinisikan dari pembacaan yang diperoleh pada kedua polaritas relatif terhadap pembacaan pada polaritas yang secara rutin digunakan. TRS-398 mendefinisikan k_{pol} sebagai (IAEA, 2024):

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2|M|}, \# (9)$$

dengan M_+ dan M_- adalah pembacaan elektrometer pada polaritas positif dan negatif secara berturut-turut, dan M adalah pembacaan pada polaritas yang secara rutin digunakan. TG-51 mendefinisikan faktor P_{pol} yang ekuivalen sebagai (Almond et al., 1999):

$$P_{pol} = \left| \frac{(M_{raw}^+ - M_{raw}^-)}{2M_{raw}} \right|, \# (10)$$

Kedua protokol tersebut mengharuskan k_{pol} untuk diukur ulang pada setiap sesi dosimetri referensi klinis karena ketergantungannya pada kualitas berkas dan posisi kabel (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). TRS-398 menetapkan bahwa koreksi polaritas untuk *reference-class chamber* harus kurang dari 0,4% dari pembacaan *chamber* sebagai bagian dari ekspektasi performa *chamber* dan memperingatkan bahwa penyimpangan dari nilai yang dipublikasikan dapat mengindikasikan masalah pada *chamber*, kabel, elektrometer, atau prosedur pengukuran (IAEA, 2024). TG-51 Addendum secara eksplisit menyatakan bahwa spesifikasi polaritas berkas foton, $0,996 < P_{pol} < 1,004$ dengan ketergantungan energi kurang dari 0,5%, tidak berlaku untuk berkas elektron dan memperingatkan bahwa mengasumsikan P_{pol} sama dengan satu pada berkas elektron dapat menimbulkan galat hingga 2% dalam pengukuran dosimetri referensi (Muir et al., 2024). Untuk kualifikasi *reference-class chamber*, addendum tersebut menetapkan $P_{pol} < 2\%$, meskipun tidak ada *action level* numerik yang setara untuk penolakan *chamber* selama penggunaan klinis yang ditentukan untuk berkas elektron (Muir et al., 2024).

Dalam kondisi berkas elektron konvensional, nilai k_{pol} yang mendekati satu biasanya diamati, meskipun jenis *chamber* memengaruhi besaran dan arahnya. Muir et al. (2024) melaporkan koreksi polaritas untuk NE2571 *cylindrical chamber* berkisar dari 0,980 hingga 1,002 pada berkas elektron energi tinggi dengan energi rata-rata antara 2 dan 10 MeV, sementara *plane-parallel chamber* berkisar dari 0,985 hingga 1,003. Liu et al. (2024a) melaporkan nilai k_{pol} sebesar 1,001, 1,005, dan 1,006 untuk Advanced Markus, A10, dan A20 *chamber*, secara berturut-turut, pada tegangan operasi yang direkomendasikan pabrikan dalam kondisi laju dosis konvensional. Yanagi et al. (2023) lebih lanjut menunjukkan arah polaritas yang bergantung pada geometri, dengan nilai k_{pol} untuk PPC05 secara konsisten di bawah satu untuk seluruh energi yang diuji (4-20 MeV), sedangkan PPC40 dan Farmer-type 30013 melebihi satu di seluruh rentang. Temuan ini menunjukkan bahwa nilai mendekati satu adalah hal umum dalam kondisi konvensional, tetapi tanda dan besarnya koreksi tetap spesifik pada jenis *chamber*.

Formalisme k_{pol} multiplikatif konvensional dapat menjadi tidak dapat diandalkan atau tidak terdefinisi ketika sinyal yang diinduksi kabel sebanding besarnya dengan arus ionisasi. Butler dan Healy (2025) menunjukkan keterbatasan ini pada berkas elektron 6 MeV dengan lapangan $25 \times 25 \text{ cm}^2$, di mana k_{pol} mencapai sekitar 400% di dekat *practical range* berkas dan satu pembacaan polaritas berubah tanda sepenuhnya. Dalam kasus seperti itu, penulis menganjurkan ekstraksi langsung M_{ion} melalui kombinasi aljabar dari pembacaan polaritas berlawanan, yang tetap valid ketika M_C sebanding dengan M_{ion} . Sesuai dengan kekhawatiran ini, panduan praktis AAPM TG-106, seperti yang dikutip dalam Butler dan Healy (2025), merekomendasikan untuk memeriksa efek polaritas ketika menggunakan *small-volume chamber*, lapangan besar, atau sumber baru di mana iradiasi kabel yang signifikan dapat terjadi. Keterbatasan ini sangat relevan untuk pengukuran elektron dalam kondisi *extended* atau lapangan besar, di mana iradiasi *extracameral* dapat menjadi tidak dapat diabaikan.

3.3. Faktor Koreksi Polaritas dalam Kondisi Extended SSD

Literatur khusus mengenai faktor koreksi polaritas pada kondisi *extended source-to-surface distance* (SSD) masih terbatas, yang mencerminkan kesenjangan yang lebih luas dalam dosimetri elektron pada geometri non-referensi. Bukti yang tersedia mengindikasikan bahwa karakteristik berkas berubah secara substansial ketika SSD diperpanjang melampaui jarak referensi 100 cm, dengan implikasi potensial untuk faktor koreksi *ionization chamber*, termasuk k_{pol} . Meskipun buktinya tidak langsung, perubahan ini memberikan dasar yang masuk akal untuk mengevaluasi kembali perilaku polaritas di luar geometri referensi standar.

Ito et al. (2025) menguantifikasi dampak dosimetrik dari *extended SSD* pada energi berkas elektron yang relevan secara klinis, yaitu 6, 9, dan 12 MeV. Mereka menunjukkan bahwa perpanjangan SSD sebesar 3 cm dari referensi 100 cm menghasilkan pengurangan dosis pada d_{max} melebihi 5% untuk semua energi dan ukuran lapangan yang diuji. Efek yang paling menonjol terjadi pada berkas 6 MeV dengan apertur melingkar 5 cm, di mana perpanjangan SSD dari 100 menjadi 105 cm menghasilkan pengurangan dosis sebesar 13,42%, perluasan ukuran lapangan sebesar 2,0 mm, dan pelebaran penumbra sebesar 4,2 mm. Yang penting, koreksi dosis pada *extended SSD* tidak mengikuti hukum kuadrat terbalik ketika SSD nominal digunakan, dan *treatment planning system* tidak memperhitungkan variasi ini, sehingga memerlukan protokol koreksi empiris institusional spesifik (Ito et al., 2025). Temuan ini menunjukkan bahwa bahkan perpanjangan SSD yang sederhana dapat mengubah kondisi berkas yang relevan dengan respons *chamber*.

Perubahan spektrum energi berkas, ukuran lapangan, dan karakteristik hamburan pada *extended SSD* dapat secara teoritis memengaruhi asimetri polaritas dalam *ionization chamber*. Petersson et al. (2017) melaporkan

nilai k_{pol} sebesar 1,017 pada SSD 100 cm dan 1,028 pada SSD 300 cm untuk Advanced Markus *chamber* di bawah tegangan grid yang sama, menunjukkan bahwa *extended SSD* dapat mengubah koreksi polaritas. Namun, efek ini tidak diselidiki secara sistematis dalam penelitian tersebut, dan perbedaannya mungkin mencerminkan perubahan simultan dalam DPP dan energi berkas elektron daripada efek SSD langsung. TRS-398 tidak menyediakan panduan khusus untuk kondisi *extended SSD* dan tidak membahas perilaku k_{pol} di luar geometri referensi (IAEA, 2024). Oleh karena itu, literatur ini mendukung kekhawatiran mengenai ketergantungan SSD tetapi belum mengisolasi SSD sebagai penentu independen k_{pol} .

Liu et al. (2024a) mengidentifikasi bahwa k_{pol} dalam *plane-parallel chamber* bergantung pada energi berkas elektron, ukuran lapangan, dan sejauh mana kabel dan *stem* yang diiradiasi, yang semuanya dapat terpengaruh ketika SSD divariasikan. Temuan ini memperkuat pentingnya mengukur ulang k_{pol} setiap kali geometri pengukuran diubah. Kelangkaan data yang dipublikasikan secara khusus membahas k_{pol} dalam kondisi *extended SSD* dengan demikian merepresentasikan celah yang jelas dalam literatur dosimetri saat ini.

3.4. Faktor Koreksi Polaritas pada Kondisi High Dose Rate Electron

Faktor koreksi polaritas menunjukkan ketergantungan yang jelas pada DPP dalam kondisi berkas *high dose rate electron* (HDRE), dengan besar dan perilakunya yang bervariasi di berbagai jenis *chamber*, tegangan operasi, dan konfigurasi berkas. Petersson et al. (2017) termasuk yang pertama secara sistematis mengkarakterisasi ketergantungan DPP dari k_{pol} pada Advanced Markus *chamber* di berbagai rentang DPP yang luas dari 10 mGy/pulse hingga 10 Gy/pulse. Pengukuran mereka menunjukkan bahwa k_{pol} meningkat seiring dengan DPP, pada SSD 30 cm dan tegangan grid 200 V, k_{pol} mencapai 1,022, 1,030, dan 1,036 untuk lebar pulsa masing-masing 0,5, 1,0, dan 1,8 μ s. Pada tegangan grid yang lebih tinggi, 300 V, dan SSD yang sama, k_{pol} mencapai 1,053, melebihi ambang batas 3% yang menurut Petersson et al. (2017) menjadi pedoman IAEA yang menyarankan untuk tidak menggunakan *chamber* untuk pengukuran dosis referensi. Efek polaritas semakin diperkuat pada tegangan polarisasi yang lebih rendah, dengan k_{pol} mencapai 1,151 pada 50 V di kondisi yang setara. Temuan ini menetapkan DPP, dan bukan laju dosis, sebagai penentu utama besarnya k_{pol} .

Investigasi selanjutnya mengkonfirmasi ketergantungan DPP di berbagai desain *chamber* tetapi menunjukkan bahwa efeknya sangat bergantung pada geometri. Liu et al. (2024a) mengevaluasi lima desain *chamber* pada berkas *ultra-high dose rate* (UHDR) klinis dan menemukan ketergantungan DPP yang kuat hanya untuk *chamber* dengan jarak elektroda yang lebih besar, dengan A20 *chamber*, 5 mm gap, dan A26 *microchamber* mencapai nilai k_{pol} 1,46-1,57 dan 1,24-1,48, secara berturut-turut, pada nilai DPP sebesar 1,06-6,32 Gy. Sebaliknya, Advanced Markus *chamber* yang dioperasikan pada ± 400 V mempertahankan k_{pol} dalam ± 1 % di semua kondisi UHDR yang diuji, yang dikaitkan dengan jarak elektroda yang lebih kecil yaitu 1 mm dan kuat medan listrik yang dihasilkan yang lebih tinggi. Paz-Martín et al. (2025) juga mengkonfirmasi ketergantungan DPP untuk Advanced Markus dan PPC05 *chamber*, dengan k_{pol} mencapai sekitar 1,030-1,035 pada 50 V dan nilai DPP 0,2-0,45 Gy/pulse, sementara nilai pada 300-400 V tetap lebih mendekati satu. Bourgouin et al. (2023) melakukan studi perbandingan terbesar hingga saat ini, dengan mengkarakterisasi k_{pol} di 22 *plane-parallel chamber* yang tersedia secara komersial dari enam model di bawah kondisi UHDPP dan melaporkan nilai yang berkisar dari 0,914 hingga 1,201, dengan variasi intra-model yang tidak dapat dijelaskan sepenuhnya oleh teori saat ini. Secara kolektif, studi-studi ini mengindikasikan bahwa ketergantungan DPP diperkuat ketika geometri *chamber* atau tegangan operasi menghasilkan kuat medan listrik yang tidak memadai.

Bukti dari kondisi HDRE moderat menunjukkan bahwa ketergantungan DPP ekstrem yang diamati pada berkas UHDR mungkin tidak secara langsung berlaku untuk semua pengaturan laju dosis tinggi. Dewi et al. (2026) mengevaluasi k_{pol} untuk PPC40, CC13, dan FC65-P *chamber* dalam kondisi HDRE, menggunakan laju dosis 300-600 MU/s dengan aplikator 40×40 cm² pada energi 6 dan 10 MeV, melaporkan nilai berkisar 0,9962 hingga 1,0001 tanpa hubungan yang konsisten antara tegangan yang diterapkan dan efek polaritas. PPC40 menunjukkan deviasi terkecil, 0,03-0,22%, yang dikaitkan dengan desain *guard ring*-nya, yang menyediakan area pengumpulan yang besar dan seragam yang meminimalkan gradien medan listrik di dalam volume sensitif. Tidak adanya efek tegangan yang signifikan dalam studi tersebut kontras dengan temuan DPP yang lebih tinggi dari Petersson et al. (2017) dan Liu et al. (2024a), menyarankan bahwa independensi tegangan mungkin spesifik untuk rentang DPP HDRE yang diteliti oleh Dewi et al. Kontras ini menyoroti kebutuhan untuk membedakan antara HDRE konvensional dan UHDR atau UHDPP ketika menafsirkan perilaku k_{pol} .

Iradiasi kabel merupakan kontributor penting terhadap koreksi polaritas yang sangat besar secara anomali pada dosimetri elektron HDRE lapangan besar. Butler dan Healy (2025) menunjukkan bahwa, dalam ruang bervolume kecil 0,02 cm³ yang diiradiasi dengan berkas elektron 6 MeV berukuran 25×25 cm², sinyal M_C yang tidak bergantung bias akibat kabel mencapai sekitar -0,09 hingga -0,10 nC per 200 MU, jauh lebih besar daripada pengukuran berkas foton yang setara. Hal ini dikaitkan dengan lapangan elektron lebar dan tidak terkolimasi yang mengiradiasi panjang kabel yang perlu dipertimbangkan. Sinyal kabel meningkat secara monoton dengan ukuran lapangan dan menghasilkan nilai k_{pol} yang tampak mendekati 400% di dekat *practical range* elektron, yang timbul dari definisi relatif faktor koreksi daripada dari perilaku anomali yang sebenarnya dalam volume ionisasi. Kranzer et al. (2021) memperkuat peran desain *chamber* dalam memitigasi efek

polaritas, menunjukkan bahwa mengurangi jarak elektroda dan memastikan geometri *guard ring* yang homogen meningkatkan efisiensi pengumpulan ion dan mengurangi efek polaritas dalam UHDPP berkas elektron. Temuan ini menunjukkan bahwa koreksi polaritas semu yang besar dapat timbul dari mekanisme internal *chamber* dan *extracameral*.

Dalam berbagai penelitian, laju dosis rata-rata secara konsisten ditemukan tidak memberikan pengaruh signifikan pada k_{pol} ketika DPP dipertahankan konstan. Liu et al. (2024a) melaporkan koefisien variansi di bawah 2% untuk k_{pol} pada *pulse repetition frequency* (PRF) sebesar 30-120 Hz pada DPP konstan. Liu et al. (2024b) mengkonfirmasi independensi serupa, dengan deviasi standar relatif <1% untuk *chamber* dengan elektroda sub-milimeter baru pada 10-120 Hz. Poppinga et al. (2021) mengamati bahwa k_{pol} meningkat dengan berkurangnya jumlah pulsa, yang sesuai dengan peningkatan DPP, hingga $1,39 \pm 0,06$ pada DPP tertinggi yang diteliti, sekitar 10-12 Gy/pulse, tanpa ketergantungan pada energi elektron atau struktur waktu dalam ketidakpastian pengukuran. Temuan-temuan ini secara kolektif mengkonfirmasi bahwa DPP, jarak antar elektroda, ukuran lapangan, dan geometri kabel, bukan laju dosis rata-rata, adalah penentu utama k_{pol} dalam dosimetri elektron HDRE.

4. FAKTOR KOREKSI REKOMBINASI ION (k_s) PADA BERKAS ELEKTRON

4.1. Teori Rekombinasi Ion

Rekombinasi ion dalam *ionization chamber* terjadi ketika pembawa muatan positif dan negatif berekombinasi sebelum mencapai elektroda pengumpul, yang menyebabkan estimasi kurang dari sinyal ionisasi sebenarnya (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). Rekombinasi awal terjadi antara ion yang terbentuk di sepanjang jalur partikel pengion tunggal dan tidak bergantung laju dosis atau DPP; untuk berkas elektron di udara, kontribusi ini umumnya kecil, <0,2% (IAEA, 2024). Rekombinasi umum, atau volume, terjadi antara ion yang terbentuk oleh jalur pengion terpisah dan sangat bergantung pada densitas ionisasi, yang berbanding dengan laju dosis di berkas kontinu dan dengan DPP pada *pulsed beam* (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). Dalam radioterapi elektron, rekombinasi umum mendominasi dan merupakan sumber utama kehilangan muatan yang terkumpul.

Dasar fisis dari rekombinasi ion pada *air-filled plane-parallel chamber* diatur oleh struktur jalur mikroskopi dan transpor muatan makroskopis. Lang et al. (2025) menjelaskan rekombinasi awal terutama bergantung pada *linear energy transfer* partikel pengion, sedangkan rekombinasi volume diatur oleh densitas pembawa muatan di dalam volume sensitif, yang meningkat secara proporsional dengan DPP. Persamaan transpor yang mengatur melibatkan persamaan diferensial parsial yang saling terkait untuk kerapatan ion positif (ρ^+), ion negatif (ρ^-), dan elektron bebas (ρ^e), dengan suku-suku untuk pembangkitan muatan, rekombinasi ion-ion dan ion-elektron, pengikatan elektron, serta pergeseran pembawa muatan di bawah medan listrik yang diterapkan. Persamaan Poisson juga diperlukan untuk menjelaskan perturbasi medan listrik oleh muatan ruang (Lang et al., 2025; Kranzer et al., 2021). Proses-proses ini memberikan dasar fisis untuk model analitik dan numerik yang digunakan untuk memperkirakan k_s .

Kerangka analitis dasar untuk rekombinasi ion dalam *pulsed beam* dikembangkan oleh Boag, yang menurunkan serangkaian model dengan kompleksitas yang meningkat berdasarkan asumsi distribusi pembawa muatan negatif di dalam volume *chamber*, seperti yang dirangkum oleh Petersson et al. (2017) dan Paz-Martín et al. (2025). Model yang paling sederhana mengasumsikan bahwa seluruh elektron yang dibebaskan langsung menempel untuk membentuk ion negatif, menghasilkan awan ion negatif seragam yang dapat berekombinasi dengan awan ion positif yang bergerak. Model selanjutnya mencakup fraksi elektron bebas p , yang didefinisikan sebagai proporsi elektron yang terbebaskan yang melintasi *gap* elektroda secara penuh sebelum terikat dengan molekul netral, sehingga mengurangi rekombinasi melalui pengumpulan muatan yang lebih cepat (Petersson et al., 2017). Paz-Martín et al. (2025) mengidentifikasi tiga asumsi fundamental dalam formulasi Boag, pelepasan muatan seketika, waktu pengikatan elektron nol, dan tidak ada perturbasi medan listrik oleh distribusi muatan ruang. Asumsi-asumsi ini menjadi semakin tidak valid seiring peningkatan DPP.

Faktor koreksi rekombinasi ion k_s didefinisikan sebagai kebalikan dari *charge collection efficiency* (CCE), yang mewakili rasio muatan yang akan dikumpulkan pada saturasi penuh terhadap muatan yang sebenarnya terkumpul. Baik TRS-398 maupun TG-51 merekomendasikan metode *two-voltage analysis* (TVA) untuk menentukan k_s pada *pulsed beam* (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). TRS-398 menetapkan polinomial kuadrat berikut (IAEA, 2024):

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2, \# (11)$$

dengan M_1 dan M_2 adalah muatan yang terkumpul pada tegangan operasi V_1 dan tegangan tereduksi V_2 , secara berturut-turut, dan koefisien tabulasi a_0 , a_1 , dan a_2 bergantung pada rasio tegangan V_1/V_2 . Untuk rasio tegangan yang direkomendasikan sebesar 3,0, koefisiennya adalah $a_0 = 1,198$, $a_1 = -0,875$, dan $a_2 = 0,677$ (IAEA, 2024). TG-51 menyajikan formulasi yang setara untuk *pulsed beam* sebagai berikut (Almond et al., 1999):

$$P_{ion}(V_H) = \frac{1 - \frac{V_H}{V_L}}{\frac{M_H^{raw}}{M_L^{raw}} - \frac{V_H}{V_L}} \cdot \#(12)$$

Kedua formulasi tersebut berasal dari teori Boag, dengan asumsi bahwa rekombinasi volume mendominasi dan bahwa Jaffé plot, $1/M$ versus $1/V$, bersifat linier dalam rentang tegangan yang digunakan (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). TRS-398 merekomendasikan rasio tegangan minimal 3 dan memberikan perkiraan sederhana yang berlaku untuk $k_s < 1,03$ (IAEA, 2024):

$$k_s \approx \frac{n-1}{n - \frac{M_1}{M_2}}; n = \frac{V_1}{V_2} \cdot \#(13)$$

Batasan kritis yang dimiliki oleh kedua protokol adalah bahwa $k_s > 1,05$ membuat TVA standar tidak dapat diandalkan; dalam kasus seperti itu, kalibrasi terhadap sistem referensi yang independen terhadap laju dosis, seperti kalorimeter, diperlukan (Almond et al., 1999; IAEA, 2024). Dengan demikian, TVA berbasis protokol tetap sesuai hanya dalam rentang rekombinasi yang terbatas.

Model analitik yang ada saat ini berbeda dalam rentang DPP yang dituju dan aplikasi klinisnya. Claessens et al. (2024) mengategorikan model-model ini menjadi tiga kelompok: persamaan Boag dan TVA turunan Boag, yang berlaku untuk radioterapi konvensional; model Di Martino, dikembangkan untuk *intraoperative electron radiotherapy* (IOERT); dan model logistik empiris Petersson, yang dikembangkan khusus untuk kondisi UHDR. Namun, tidak ada satu model pun yang dapat secara akurat memperkirakan k_s di seluruh rentang DPP yang ditemui dalam radioterapi elektron kontemporer, dari $<1,3$ mGy/pulse dalam perawatan konvensional hingga 0,5-10 Gy/pulse dalam kondisi FLASH (Claessens et al., 2024). Keterbatasan ini memotivasi pertimbangan terpisah untuk kondisi konvensional, HDRE, FLASH, dan *extended SSD*.

4.2. Faktor Koreksi Rekombinasi Ion dalam Kondisi Laju Dosis Konvensional

Dalam kondisi radioterapi konvensional, di mana DPP biasanya di bawah 1,3 mGy/pulse, rekombinasi ion umumnya kecil dan biasanya dapat dikoreksi menggunakan TVA (Claessens et al., 2024). Dewi et al. (2026) melaporkan nilai k_s pada kondisi berkas elektron standar, menggunakan aplikator $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dan tegangan bias 300 V, sebesar 1,0050 dan 1,0046 untuk PPC40 pada 6 dan 10 MeV, secara berturut-turut; 1,0078 dan 1,0084 untuk CC13; dan 1,0099 dan 1,0094 untuk FC65-P. Yanagi et al. (2023) juga melaporkan nilai k_s di rentang 1,000-1,010 untuk PPC05 dan PPC40 di rentang 4-20 MeV pada laju dosis 1000 MU/min. PPC05 menghasilkan nilai k_s tertinggi pada seluruh energi, temuan ini dikaitkan dengan jarak elektroda yang lebih kecil yaitu 0,6 mm dibandingkan dengan jarak 2,0 mm pada PPC40. Secara bersamaan, hasil ini menunjukkan koreksi rekombinasi kecil dalam kondisi berkas elektron konvensional tetapi tetap bergantung pada *chamber*.

Validitas klinis TVA pada DPP konvensional dan yang mendekati konvensional telah dievaluasi terhadap pengukuran referensi independen. Petersson et al. (2017), menggunakan pengukuran film dan *ionization chamber* secara simultan, menetapkan bahwa metode TVA tetap valid hingga sekitar 10 mGy/pulse, menghasilkan $k_s = 1,009 \pm 0,2\%$ pada pengaturan iradiasi terendah yang diteliti. Dengan melakukan *fitting* pada model Boag, mereka menentukan fraksi elektron bebas p berkisar dari 0,08-0,12 pada 50 V hingga 0,24-0,34 pada 300 V, yang mencerminkan ketergantungan tegangan pada efisiensi pengikatan elektron di dalam *chamber*. Akan tetapi, di atas 10 mGy/pulse, TVA secara progresif memberikan estimasi berlebih dari nilai k_s relatif terhadap nilai referensi yang diperoleh dari film, dengan galat yang terus meningkat pada DPP yang lebih tinggi (Petersson et al., 2017). Temuan ini menempatkan perkiraan batas atas pada keandalan TVA konvensional dalam *pulsed electron beam*.

Penelitian yang lebih baru menunjukkan bahwa bias TVA sistematis mungkin muncul bahkan sebelum transisi ke kondisi DPP yang jelas tinggi. Paz-Martín et al. (2025) menggabungkan simulasi numerik dan eksperimen untuk menunjukkan bahwa TVA secara sistematis memberikan estimasi berlebih dari nilai k_s bahkan dalam rentang DPP konvensional. Pasangan tegangan berbeda dengan rasio tegangan yang sama menghasilkan hubungan M_1/M_2 versus k_s yang berbeda, yang secara langsung bertentangan dengan prediksi Boag tentang hubungan unik yang hanya didasarkan pada rasio tegangan. Rasio muatan bergantung pada pasangan tegangan aktual yang digunakan, bukan hanya pada rasio tegangan, dengan perbedaan yang meningkat seiring dengan DPP dan memberikan galat yang tidak dapat diabaikan meski pada DPP rendah. Sesuai dengan kekhawatiran ini TRS-398 memperingatkan bahwa, linearitas Jaffé plot yang diharapkan mungkin tidak terpenuhi dalam interval tegangan yang digunakan untuk TVA dan merekomendasikan penetapan rentang linier selama komisioning (IAEA, 2024). Sehingga, meskipun TVA tetap memadai secara klinis dalam kondisi konvensional, asumsinya menjadi semakin rapuh seiring DPP mendekati area IOERT dan HDRE.

4.3. Faktor Koreksi Rekombinasi dalam Kondisi HDRE dan FLASH

Ketika DPP meningkat melampaui rentang konvensional, mencapai 3-130 mGy/pulse dalam IOERT dan 0,5-10 Gy/pulse dalam kondisi HDRE dan FLASH, model analitik TVA dan Boag standar secara progresif gagal untuk mengkarakterisasi rekombinasi ion secara akurat. Claessens et al. (2024) menyoroti bahwa koreksi yang melebihi 60% diperlukan pada nilai DPP FLASH dan bahwa tidak ada model analitik saat ini yang dapat secara akurat memperkirakan k_s di seluruh rentang DPP yang ditemui dalam radioterapi elektron modern. Keterbatasan utamanya adalah peningkatan DPP menghasilkan efek muatan ruang dan perturbasi medan listrik yang melanggar asumsi yang mendasari teori rekombinasi konvensional.

Kegagalan teori rekombinasi standar pada DPP tinggi secara sistematis didokumentasikan oleh Petersson et al. (2017) pada Advanced Markus *ionization chamber* di rentang DPP yang berkisar dari 10 mGy hingga 10 Gy/pulse. Model Boag hanya menjelaskan efisiensi pengumpulan ion dengan baik pada tegangan polarisasi rendah, 50 V, memperoleh $R^2 = 0,998$. Pada tegangan yang digunakan secara klinis sebesar 300 V, nilai R^2 berkurang menjadi 0,936-0,957, mencerminkan peran distorsi muatan ruang yang semakin besar dari medan listrik pada tegangan operasi yang lebih tinggi. TVA sangat melebih-lebihkan nilai k_s untuk DPP di atas 10 mGy/pulse. Petersson et al. (2017) oleh karena itu mengusulkan model logistik empiris:

$$k_s = \left(1 + \left(\frac{DPP [mGy]}{U [V]} \right)^a \right)^b, \# (14)$$

dengan konstanta *fitting* gabungan $a = 2,5$ dan $b = 0,144$ untuk Advanced Markus *chamber* pada 300 V dan lebar pulsa 1,8 μs mencapai $R^2 = 0,998$ di ketiga *chamber* yang diuji. Model ini juga mengonfirmasi bahwa k_s ditentukan oleh DPP dan bukan laju dosis rata-rata, karena pengukuran pada DPP tetap di seluruh PRF sebesar 10-200 Hz tidak menunjukkan perubahan efisiensi pengumpulan ion (Petersson et al., 2017).

Studi selanjutnya mengonfirmasi bahwa kegagalan TVA tidak terbatas pada wilayah DPP yang sempit tetapi berkembang di rentang DPP yang luas. Claessens et al. (2024) menguantifikasi estimasi TVA yang sistematis, baik yang memberikan estimasi berlebih dan estimasi kurang hingga 18,8% pada 2,30 Gy/pulse dan -36,0% pada 4,31 Gy/pulse. Ketika model logistik Petersson dibandingkan dengan model *machine learning* XGBoost menggunakan data tes independen, dengan $R^2 = 0,940$ untuk XGBoost, keduanya mengungguli TVA. Model Petersson lebih disukai karena alasan parsimoni, sebagaimana dinilai oleh *corrected Akaike Information Criterion*, dengan $\Delta AICc = 1,68$ dibandingkan dengan 11,42 untuk XGBoost (Claessens et al., 2024). Paz-Martín et al. (2025) lebih lanjut menunjukkan melalui simulasi numerik satu dimensi bahwa model analitik Boag tidak sesuai dengan hasil numerik dan data eksperimental bahkan di bawah 30 mGy/pulse. Model Boag pertama, CCE₁, yang tidak memasukkan elektron bebas, secara konsisten memberikan estimasi kurang CCE relatif terhadap seluruh model yang menggabungkan kontribusi elektron bebas. Model analitik lengkap sesuai dengan simulasi numerik hingga 0,3% hanya di bawah 85 mGy/pulse untuk parameter Advanced Markus; di atas ambang batas ini, perturbasi medan listrik menyebabkan perbedaan tersebut. Simulasi numerik mencapai kesepakatan rata-rata dengan data CCE eksperimental sebesar 0,5% untuk Advanced Markus dan 0,7% untuk PPC05 (Paz-Martín et al., 2025). Temuan ini menunjukkan transisi yang konsisten dari perilaku rekombinasi konvensional ke respons yang didominasi muatan ruang seiring peningkatan DPP.

Jarak antar elektroda telah muncul sebagai parameter desain *chamber* yang paling kritis yang mengatur k_s di bawah kondisi HDRE dan FLASH. Kranzer et al. (2021), menggunakan kalibrasi referensi alanin/ICT independen, menunjukkan bahwa mengurangi jarak elektroda dari 2 mm ke 0,5 mm pada *end-window chamber* meningkatkan efisiensi pengumpulan ion di rentang UHDR DPP. Mereka juga menunjukkan bahwa *guard ring* yang lebar dari Advanced Markus *chamber* memberikan homogenitas medan listrik yang lebih besar daripada desain yang kompak secara geometri dengan jarak elektroda yang setara. Yang penting, Kranzer et al. (2021) menemukan bahwa metode Jaffé/TVA memberikan estimasi kurang dari k_s pada nilai DPP IOERT sedang sebesar 3-130 mGy/pulse dan sangat memberikan estimasi berlebih pada nilai DPP ultra-tinggi >1 Gy/pulse, di mana Jaffé plot mendekati nilai saturasi yang hampir konstan. Kegagalan dua arah ini berarti TVA tidak memberikan perkiraan yang konservatif maupun andal di seluruh rentang DPP dari kondisi IOERT hingga FLASH.

Peran sentral dari jarak elektroda dan kuat medan listrik semakin diperkuat oleh studi perbandingan desain *chamber* pada jalur berkas elektron UHDR klinis. Liu et al. (2024a) mengkonfirmasi bahwa DPP merupakan satu-satunya penentu respons *ion chamber*, terlepas dari laju dosis rata-rata hingga 963 Gy/s dan laju dosis sesaat hingga 2 MGy/s, di lima desain ruang ionisasi. Pada DPP tertinggi yang diuji sebesar 6,32 Gy, CCE berkisar dari 2,4% untuk A20, dengan *gap* 5 mm, hingga 67% untuk prototipe TPP, dengan *gap* 0,3 mm, yang menggambarkan ketergantungan yang kuat pada jarak elektroda. Advanced Markus *chamber* pada 400 V memperoleh CCE yang sebanding atau lebih unggul dibandingkan *chamber* yang tersedia secara komersial yang dioperasikan pada 1000 V, menunjukkan bahwa kuat medan listrik, bukan tegangan absolut, yang mengatur performa pengumpulan ion. Liu et al. (2024b) selanjutnya menetapkan jarak elektroda sub-milimeter sebagai strategi desain yang paling efektif untuk dosimetri FLASH, dengan konfigurasi 0,2 mm mencapai CCE $\geq 99\%$ pada DPP hingga 7 Gy pada 1000 V/mm. *Chamber* A30 mereka, dengan *gap* 0,3 mm dan kuat medan listrik 1000 V/mm, memperoleh CCE $\geq 95\%$ untuk DPP hingga 5 Gy tanpa ketergantungan lebar pulsa yang teramat. Ketergantungan lebar pulsa yang diamati pada 500 V/mm menjadi dapat diabaikan pada 1000 V/mm dan di

atasnya, menetapkan jalur desain yang layak menuju *reference-class chamber* untuk dosimetri referensi FLASH elektron.

Pada DPP ekstrem yang mendekati 10-12 Gy/pulse, Poppinga et al. (2021) mengukur CCE sekitar 30% untuk Advanced Markus *chamber* dalam *very high energy electron* (VHEE) *beam* di CERN CLEAR, yang sesuai dengan nilai k_s turunan secara perkiraan sebesar 3,3. Hasil ini menunjukkan kesesuaian yang baik dengan model empiris Petersson yang diekstrapolasikan ke durasi pulsa yang lebih pendek, dengan minimum 500 ns, dan dengan perhitungan numerik berdasarkan kerangka kerja Gotz et al., yang mendukung validitas prediksi model pada kondisi DPP ekstrem. Lang et al. (2025) mengusulkan pendekatan *finite element analysis* yang menggabungkan fisika pergeseran ion, pengikatan, rekombinasi, dan difusi, yang menunjukkan bahwa model Boag standar secara sistematis memberikan estimasi kurang dari k_s pada kondisi UHDR karena distorsi muatan ruang dari medan listrik. Model *finite element* mereka menunjukkan kesesuaian yang lebih baik dengan data eksperimental dibandingkan dengan formula Boag dan mengkonfirmasi bahwa mengurangi *gap* elektroda, meningkatkan tegangan polarisasi, atau mengurangi tekanan *chamber* hingga 16 mbar secara efektif mengurangi efek saturasi ion.

Pendekatan dosimetri alternatif telah dieksplorasi untuk penentuan k_s independen dalam area UHDR. Motta et al. (2024) menunjukkan bahwa *thermoluminescence dosimeter* (TLD) dan *optically stimulated luminescence dosimeter* (OSLD) tidak menunjukkan ketergantungan laju dosis hingga 3×10^5 Gy/s dan mengusulkan penggunaan rasio DPP yang diturunkan dari luminesensi terhadap DPP *ionization chamber* yang tidak terkoreksi sebagai metode penentuan k_s eksperimental. Nilai k_s turunan eksperimental menyimpang dari model logistik Petersson maksimal +3% pada 170 mGy/pulse dan -5% pada 740 mGy/pulse, dengan perbedaan yang sebagian disebabkan oleh perbedaan durasi pulsa antara parameterisasi, 1,8 μ s, dan berkas eksperimental, 4,2 μ s. Model logistik spesifik berkas dan spesifik *chamber* yang di-*fitting* ke nilai k_s yang diturunkan dari OSL memberikan akurasi yang lebih baik, dengan ketidakpastian yang direkomendasikan sebesar 5%, $k = 1$, jika parameterisasi Petersson generik harus digunakan tanpa *fitting* ulang spesifik berkas (Motta et al., 2024). Temuan ini mendukung kalibrasi berbasis detektor independen ketika faktor koreksi *ion chamber* menjadi bergantung pada model.

Bourgouin et al. (2023) melakukan perbandingan antar *plane-parallel chamber* yang tersedia secara komersial yang paling komprehensif dalam berkas elektron UHDPP, mengkarakterisasi 22 *chamber* dari enam model pada nilai DPP sebesar 0,1-6,4 Gy/pulse. Variasi CCE intra-model mencapai hingga 20% pada DPP tertinggi yang diuji, dengan variasi inter-model rata-rata 10% di antara *chamber* yang memiliki jarak elektroda 2 mm pada 6 Gy/pulse; deviasi antar-model maksimum adalah 32%. Analisis sensitivitas *gap* elektroda tidak dapat sepenuhnya menjelaskan variasi intra-model yang diamati, dan sumber utamanya tetap tidak teridentifikasi. Suhu dan tekanan atmosfer merupakan kontributor yang signifikan: perbedaan 1,9 °C dan 4,1 kPa antara fasilitas pengukuran menghasilkan variasi CCE sekitar 5% untuk Advanced Markus *chamber* yang sama, menggarisbawahi perlunya pelaporan dan koreksi sistematis terhadap kondisi lingkungan. Bourgouin et al. (2023) menyimpulkan bahwa *plane-parallel chamber* yang tersedia secara komersial saat ini tidak cocok sebagai standar sekunder untuk dosimetri referensi berkas elektron UHDPP, mengingat total ketidakpastian standar relatif gabungan sebesar 1,3% dalam koreksi rekombinasi ion. Dengan tidak adanya standar dosimetri referensi primer yang mapan untuk berkas UHDR, Palmiero et al. (2025) merekomendasikan dosimetri redundan menggunakan setidaknya tiga sistem detektor independen berdasarkan prinsip fisika yang berbeda.

Dalam studi DPP tinggi, k_s secara konsisten bergantung pada DPP dan bukan laju dosis rata-rata. Petersson et al. (2017), Liu et al. (2024a), dan Poppinga et al. (2021) semuanya menunjukkan bahwa, ketika DPP tetap, perubahan PRF atau laju dosis sesaat tidak secara substansial mengubah efisiensi pengumpulan ion. Temuan ini memiliki implikasi praktis yang penting: koreksi k_s yang ditetapkan pada DPP tertentu mungkin tetap berlaku di berbagai PRF, menyederhanakan karakterisasi dosimetri dari berkas sinar HDRE dan FLASH di mana parameter struktur waktu dapat bervariasi.

4.4. Faktor Rekombinasi Ion dalam Kondisi Extended SSD

Pengaruh *extended SSD* pada rekombinasi ion terutama bekerja melalui efeknya pada DPP. Seiring SSD meningkat, DPP yang diterima *chamber* berkurang secara aproksimasi sesuai dengan hukum kuadrat terbalik, meskipun tidak persis, seperti yang ditunjukkan oleh Ito et al. (2025), sehingga mengurangi rekombinasi umum. TRS-398 secara eksplisit menyatakan bahwa, pada *pulsed beam* di mana rekombinasi umum mendominasi, k_s secara aproksimasi berbanding secara linear dengan DPP dan menyarankan variasi SSD sebagai metode praktis untuk memodulasi DPP ketika menerapkan metode rekombinasi umum (IAEA, 2024). Oleh karena itu, *extended SSD* memberikan variabel pengukuran dan strategi mitigasi potensial untuk efek rekombinasi.

Ito et al. (2025) menguantifikasi pengurangan dosis pada d_{max} untuk berkas elektron klinis 6, 9, dan 12 MeV sebagai fungsi *extended SSD*, melaporkan pengurangan dosis sebesar 6-13% pada perpanjangan 3-5 cm di luar referensi 100 cm. Karena DPP berbanding secara proporsional dengan keluaran dosis di bawah parameter berkas yang konstan, pengurangan ini secara langsung diterjemahkan ke persyaratan koreksi rekombinasi yang lebih rendah pada *extended SSD*. Untuk unit HDRE dan FLASH, di mana rekombinasi ion pada SSD standar mungkin

terlalu besar, pengurangan DPP dengan peningkatan SSD memberikan strategi dosimetri yang praktis. Palmiero et al. (2025) mengoperasionalkan pendekatan ini dengan merekomendasikan agar *ion chamber* diposisikan pada *extended* SSD untuk pemantauan konstansi harian unit FLASH, menggunakan *extended* SSD sebesar 110 cm untuk mengurangi DPP secara memadai untuk pengukuran keluaran berbasis

chamber tanpa kehilangan rekombinasi yang terlalu besar. Studi-studi ini mendukung relevansi praktis penyesuaian SSD, meskipun mereka tidak sepenuhnya mengkarakterisasi k_s sebagai fungsi independen dari SSD.

Petersson et al. (2017) memasukkan *extended* SSD ke dalam desain eksperimental mereka dengan menggunakan SSD 300 cm sebagai kondisi referensi DPP terendah untuk pengukuran Advanced Markus *chamber*. Pada jarak ini, TVA menghasilkan $k_s = 1,045$, sedangkan pengukuran film simultan menemukan $k_s < 1,010$, menunjukkan bahwa TVA memberikan estimasi berlebih bahkan dalam kondisi *extended* SSD di mana SSD berkurang secara substansial. Temuan ini menunjukkan bahwa estimasi berlebih sistematis yang melekat pada TVA tidak terbatas pada DPP tinggi tetapi tetap ada pada nilai DPP yang dapat dicapai pada jarak SSD yang besar. Hal ini juga konsisten dengan temuan numerik yang lebih luas dari Paz-Martín et al. (2025), yang melaporkan estimasi berlebih TVA di seluruh rentang DPP yang diteliti.

Data eksperimental khusus mengenai k_s sebagai fungsi sistematis dari SSD pada berkas elektron masih langka. Tidak ada penelitian yang diidentifikasi dalam tinjauan ini yang secara sistematis mengukur k_s pada beberapa nilai *extended* SSD dalam kondisi berkas elektron yang identik. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan yang signifikan dalam literatur dosimetri, khususnya untuk aplikasi HDRE di mana *extended* SSD mungkin menjadi strategi utama untuk mengurangi rekombinasi ion yang parah, dan untuk dosimetri *total skin electron irradiation* di mana SSD secara rutin melebihi 100 cm. Ketiadaan data faktor koreksi khusus untuk konfigurasi ini menggarisbawahi perlunya investigasi eksperimental yang terarah.

5. KEBUTUHAN PENGEMBANGAN FAKTOR KOREKSI DENGAN PERTIMBANGAN PERBEDAAN UKURAN LAPANGAN PADA KONDISI LAPANGAN KECIL

Ukuran lapangan berpengaruh pada beberapa hal dalam dosimetri berkas elektron seperti terpenuhinya *lateral charged particle equilibrium* (LCPE), *lateral scatter equilibrium* (LSE), dan *lateral electronic equilibrium* (LEQ); dosis permukaan berkas elektron; laju dosis; spektrum dan kualitas berkas elektron; kurva PDD; profil lateral berkas elektron; OF; variasi faktor perturbasi; dan efek *volume averaging* (Alfonso et al., 2008; Gibbons, 2020; IAEA, 2017; Podgorsak, 2005). Efek tersebut berkaitan antara satu dengan yang lain. Ketika lapangan berukuran kecil, LSE dan LEQ tidak tercapai dan terjadi kondisi nonekuilibrium. Ketika ukuran lapangan berkurang hingga LSE tidak terpenuhi, kedalaman dosis maksimum semakin mendekat ke permukaan dan dosis permukaan relatif meningkat seiring menurunnya ukuran lapangan (Khan, 1991; Podgorsak, 2005). Selain itu, laju dosis berkurang secara cepat (Gibbons, 2020). Akibatnya, kurva PDD dan OF akan menjadi sensitif terhadap bentuk dan ukuran lapangan. Lebih lanjut, fluens partikel uniform yang mampu mengelilingi detektor ketika lapangan berukuran kecil juga tidak terpenuhi. Pada kondisi tersebut, teori rongga (*cavity theory*) yang dijadikan dasar asumsi penggunaan *ionization chamber* sebagai detektor dosimetri menjadi tidak sesuai. Pada lapangan kecil di mana LCPE tidak terpenuhi, keberadaan detektor mampu mengubah LCPE lokal sehingga perturbasi bertambah (Das et al., 2008; IAEA, 2017).

Keberadaan detektor dapat berpengaruh ketika ukuran detektor relatif besar dibandingkan dengan ukuran lapangan berkas. Efek tersebut terjadi akibat *ionization chamber* yang menyebabkan perturbasi fluens partikel di dalam medium sehingga faktor konversi *ionization-to-dose* menjadi tidak akurat. Ketidakakuratan ini juga berkaitan dengan cara *ionization chamber* menghasilkan sinyal. Suatu detektor menghasilkan sinyal yang proporsional dengan dosis serap rata-rata pada seluruh volume sensitif detektor. Maka dari itu, ketika volume sensitif detektor tidak menerima sinyal yang homogen akibat ukuran detektor yang lebih besar daripada ukuran lapangan berkas, hasil dosis yang dirata-ratakan pun menjadi tidak akurat dan berpengaruh ke respons detektor.

Untuk mengakomodasi hal tersebut, IAEA TRS-483 menambahkan faktor koreksi efek *volume averaging*, $p_{vol} \cdot p_{vol}$ didefinisikan sebagai rasio antara dosis serap air pada titik referensi di dalam *phantom* air dan dosis serap rata-rata pada volume air yang menggantikan seluruh volume sensitif detektor. Namun, faktor koreksi tersebut belum diterapkan pada dosimetri berkas elektron melalui protokol resmi. Padahal, efek perataan volume juga tampak pada berkas elektron lapangan kecil. Inan dan Vefa Gul (2026) menyatakan bahwa setiap *ionization chamber* dengan volume sensitif berbeda yang mereka gunakan dalam penelitiannya memiliki variasi sensitivitas terhadap efek perataan volume dan efek tepi pada dosimetri berkas elektron lapangan kecil (Inan & Vefa Gul, 2026). Maka dari itu, berkas elektron lapangan kecil tidak luput dari dibutuhkannya faktor koreksi kualitas berkas yang mempertimbangkan perbedaan antara respons detektor pada dua ukuran lapangan berbeda dengan kualitas berkasnya masing-masing yang hingga saat ini belum ditetapkan pada protokol resmi.

Hal ini semakin dikuatkan dengan majunya perkembangan teknologi terapi menggunakan berkas elektron lapangan kecil seperti untuk *booster*, keloid, dan *intraoperative radiotherapy with electron* (IOERT) (Calvo et al., 2013; Lee et al., 2025; Gibbons, 2020; Rustgi & Working, 1992). Berkas elektron lapangan kecil dapat diatur dengan penggunaan *blocking* atau aplikator khusus. IOERT yang menggunakan aplikator silindris khusus untuk membentuk berkas umumnya memiliki diameter maksimal aplikator sebesar 10 cm (Mihailescu et al., 2005).

Kondisi ini menyebabkan ukuran lapangan maksimal aplikator IOERT tidak dapat mencapai ukuran lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ yang diatur sebagai referensi dalam IAEA TRS-398. Saat ini, IOERT masih terus berkembang, sehingga perkembangan dalam dosimetri berkas elektron lapangan kecil turut dibutuhkan.

6. KETIDAKPASTIAN GABUNGAN DAN IMPLIKASI PROTOKOL

Penentuan dosis serap air dalam dosimetri berkas elektron melibatkan perkalian beberapa faktor koreksi, yang masing-masing membawa kontribusi ketidakpastiannya sendiri. Sebagaimana ditunjukkan pada bagian-bagian sebelumnya, pembacaan *ionization chamber* M_Q dikoreksi terhadap kualitas berkas k_{Q,Q_0} , efek polaritas k_{pol} , efek rekombinasi ion k_s , serta tekanan dan suhu k_{TP} . Ketidakpastian gabungan dalam penentuan dosis akhir merepresentasikan jumlah kuadrat dari ketidakpastian masing-masing faktor koreksi. Dengan demikian, ketidakpastian kumulatif sangat dipengaruhi oleh kondisi pengukuran, jenis *ionization chamber*, dan kondisi laju dosis yang digunakan.

Dalam kondisi referensi yang dicakup oleh TRS-398 Rev. 1 dan TG-51 Addendum, kontribusi individual k_{pol} dan k_s terhadap total ketidakpastian relatif kecil dan telah terdokumentasi dengan baik. TG-51 Addendum menyediakan anggaran ketidakpastian terstruktur untuk *reference-class chamber*: ketika seluruh komponen dievaluasi dengan benar, kontribusi k_{pol} adalah 0,05% dan kontribusi k_s adalah 0,10% (Muir et al., 2024). Dalam kondisi peralatan tipikal dengan asumsi yang berpotensi dipertanyakan, kedua kontribusi tersebut masing-masing meningkat hingga 0,50% (Muir et al., 2024). Ketidakpastian k_{Q,Q_0} juga telah dikarakterisasi melalui perhitungan Monte Carlo oleh Muir dan Rogers (2014) serta Alissa et al. (2024), dengan nilai RMSD masing-masing sebesar 0,15% dan 0,16-0,24%. Secara eksperimental, Mahfirotin et al. (2023) menunjukkan bahwa diskrepansi k_{Q,Q_0} antara *modified calibration* dan TRS-398 tetap berada dalam rentang 0,994-1,003 untuk *cylindrical chamber* dan 0,986-1,009 untuk *plane-parallel chamber*, dengan deviasi standar dosis per monitor unit sebesar 0,4-0,5%. Seluruh nilai tersebut masih jauh di bawah batas toleransi klinis $\pm 2\%$ yang ditetapkan dalam TRS-398. Secara keseluruhan, bukti ini menunjukkan bahwa pada kondisi referensi konvensional, ketidakpastian dari faktor koreksi utama masih dapat dikendalikan dalam kerangka protokol yang berlaku.

Akan tetapi, lanskap ketidakpastian berubah secara substansial pada kondisi DPP tinggi. Pada kondisi ini, baik k_{pol} maupun k_s dapat menyimpang secara bermakna dari nilai konvensional dan menjadi sangat bergantung pada jenis *ionization chamber* serta model koreksi yang digunakan. Untuk k_{pol} , pada DPP yang mendekati dan melebihi 1 Gy/pulse, nilai yang dilaporkan berkisar dari 0,914 hingga 1,201 pada 22 *plane-parallel chamber* komersial (Bourgouin et al., 2023), jauh melampaui spesifikasi *reference-class chamber* sebesar 0,4% dalam TRS-398. Untuk k_s , TVA, yang memberikan hasil andal dalam $\pm 0,2\%$ pada DPP konvensional (Petersson et al., 2017), terbukti memberikan estimasi berlebih hingga 36% pada 4,31 Gy/pulse (Claessens et al., 2024). Model logistik Petersson menurunkan galat ini, tetapi tetap memiliki ketidakpastian yang diperluas sebesar 5,5% ($k = 2$) untuk parameter spesifik *chamber* dan 8,0% untuk parameter umum (Petersson et al., 2017). Selain itu, total ketidakpastian standar relatif gabungan pada faktor koreksi rekombinasi ion saja mencapai 1,3% pada kondisi UHDPP (Bourgouin et al., 2023), melebihi total anggaran ketidakpastian yang diizinkan untuk dosimetri *reference-class* dalam kondisi konvensional. Variasi suhu sebesar $1,9^\circ\text{C}$ dan tekanan atmosfer sebesar 4,1 kPa antara dua fasilitas pengukuran juga menghasilkan variasi CCE sekitar 5% untuk *chamber* yang sama (Bourgouin et al., 2023), sehingga menambah sumber ketidakpastian yang belum secara eksplisit diakomodasi dalam anggaran ketidakpastian protokol saat ini untuk kondisi HDRE. Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa pada kondisi DPP tinggi, ketidakpastian tidak lagi didominasi oleh variasi kecil faktor koreksi, tetapi oleh keterbatasan model koreksi dan sensitivitas *chamber* terhadap kondisi pengukuran.

Implikasi dari temuan tersebut sangat penting bagi penerapan protokol dosimetri yang berlaku. TRS-398 Rev. 1 dan TG-51 Addendum secara eksplisit mengecualikan penerapannya pada berkas UHDR, terutama ketika efisiensi pengumpulan ion menyimpang secara substansial dari perilaku konvensional (IAEA, 2024; Muir et al., 2024). TRS-398 Rev. 1 menyatakan bahwa $k_s > 1,05$ membuat formalisme TVA standar tidak berlaku dan mengarahkan pengguna pada literatur yang dipublikasikan untuk DPP tinggi non-standar, termasuk konfigurasi IOERT dan FLASH (IAEA, 2024). Sebaliknya, belum tersedia panduan setara untuk k_{pol} pada kondisi DPP tinggi. Protokol yang berlaku juga belum menyediakan panduan khusus untuk kondisi *extended SSD*, lapangan kecil, maupun ketidakpastian gabungan yang muncul ketika beberapa kondisi non-referensi hadir secara bersamaan. Dalam konteks ini, Palmiero et al. (2025) mencatat belum adanya metodologi dosimetri referensi yang diterima secara universal untuk berkas UHDR dan merekomendasikan dosimetri redundan menggunakan setidaknya tiga sistem detektor independen dengan prinsip fisika yang berbeda sebagai pendekatan interim yang praktis. Dengan demikian, keterbatasan protokol saat ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berdampak langsung pada strategi validasi dosimetri untuk modalitas elektron non-konvensional.

Kesenjangan ini menunjukkan perlunya pengembangan simultan di beberapa area dosimetri berkas elektron. Untuk k_{Q,Q_0} , repositori daring yang diusulkan dalam TG-51 Addendum untuk memperbarui data spesifik *chamber* seiring tersedianya perhitungan Monte Carlo baru merupakan jalur praktis untuk memperluas cakupan

protokol ke *chamber* yang baru dikembangkan, termasuk desain yang dioptimalkan untuk kondisi FLASH (Muir et al., 2024; Liu et al., 2024a; Liu et al., 2024b). Untuk k_{pol} dan k_s pada kondisi HDRE dan UHDR, metodologi koreksi yang berkembang, seperti parameterisasi polinomial dari Paz-Martín et al. (2025) dan model logistik dari Petersson et al. (2017) yang telah divalidasi oleh Motta et al. (2024) dan Claessens et al. (2024), memberikan basis bukti yang semakin kuat, meskipun belum satu pun diadopsi ke dalam kode praktik internasional. Untuk dosimetri berkas elektron lapangan kecil, perluasan faktor koreksi *volume averaging* p_{vol} dari TRS-483 ke berkas elektron tetap menjadi kebutuhan yang belum terpenuhi (IAEA, 2017). Konvergensi antara pembaruan protokol, desain *chamber* baru, dan perkembangan aplikasi klinis FLASH menggarisbawahi urgensi upaya internasional yang terkoordinasi untuk membangun kerangka dosimetri yang komprehensif bagi modalitas berkas elektron saat ini dan yang akan datang.

7. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Tinjauan ini menunjukkan bahwa faktor koreksi kualitas berkas elektron k_{Q,Q_0} dalam dosimetri referensi berkas elektron telah berkembang signifikan melalui pembaruan data Monte Carlo modern yang tercermin dalam IAEA TRS-398 Rev. 1 dan AAPM WGTG51 Report 385. Nilai k_{Q,Q_0} dari perhitungan modern cenderung ~0,5% lebih rendah dibandingkan tabel TRS-398 lama. Studi multisenter oleh Mahfirotin et al. (2023) mengonfirmasi bahwa variabilitas antar institusi tetap berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$; namun, *plane-parallel chamber* menunjukkan variabilitas yang lebih besar dibandingkan *cylindrical chamber*. Oleh karena itu, pemilihan jenis *chamber* dan adopsi data k_{Q,Q_0} berbasis Monte Carlo terkini perlu diperhatikan dalam praktik klinis.

Untuk faktor koreksi polaritas k_{pol} , DPP, jarak elektroda, ukuran lapangan, dan geometri kabel merupakan penentu utama besarnya koreksi, bukan laju dosis rata-rata. Iradiasi kabel dapat menjadi sumber dominan koreksi polaritas semu yang besar pada berkas lapangan besar dan HDRE, terutama pada *chamber* bervolume kecil. Untuk faktor koreksi rekombinasi ion k_s , TVA terbukti tidak memadai di luar DPP konvensional, <10 mGy/pulse, dan belum ada model analitik tunggal yang berlaku di seluruh spektrum DPP dari konvensional hingga FLASH. Pada kondisi HDRE dan UHDR, jarak elektroda sub-milimeter dengan kuat medan listrik tinggi menjadi parameter desain *chamber* yang paling kritis, sedangkan detektor independen seperti TLD dan OSLD dapat digunakan untuk validasi eksperimental k_s .

Pada kondisi lapangan kecil, hilangnya keseimbangan partikel bermuatan lateral dan efek *volume averaging* memerlukan faktor koreksi tambahan yang belum ditetapkan dalam protokol resmi. Secara keseluruhan, ketidakpastian gabungan dosimetri berkas elektron masih terkendali pada kondisi referensi konvensional, tetapi meningkat secara substansial pada kondisi DPP tinggi, *extended SSD*, dan lapangan kecil, yaitu kondisi-kondisi ketika protokol yang berlaku belum memberikan panduan yang memadai.

Berdasarkan temuan tersebut, beberapa rekomendasi dapat diajukan. Pertama, pengembangan kode praktik dosimetri yang secara eksplisit mencakup kondisi HDRE, FLASH, dan *extended SSD* perlu menjadi prioritas internasional. Kedua, *chamber* dengan jarak elektroda sub-milimeter dan kuat medan listrik tinggi perlu dipertimbangkan sebagai kandidat *chamber* referensi untuk dosimetri FLASH. Ketiga, studi eksperimental sistematis terhadap k_{pol} dan k_s pada kondisi *extended SSD* perlu dilakukan, terutama untuk aplikasi *total skin electron irradiation* dan HDRE. Keempat, perluasan faktor koreksi *volume averaging* p_{vol} dari TRS-483 ke dosimetri berkas elektron lapangan kecil perlu diprioritaskan dalam revisi protokol berikutnya.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan tinjauan literatur ini, penulis menggunakan alat bantu kecerdasan buatan untuk membantu proses penulisan, meliputi pengorganisasian materi dari literatur yang telah dipilih dan disediakan oleh penulis, perumusan alternatif redaksi, serta perbaikan tata bahasa, struktur, dan alur penulisan akademik. Claude (Anthropic) dan ChatGPT (OpenAI) digunakan sebagai alat bantu penulisan dan penyuntingan, bukan sebagai sumber rujukan ilmiah.

Seluruh pemilihan literatur, penilaian relevansi sumber, verifikasi isi, interpretasi temuan, penyusunan argumen ilmiah, serta keputusan editorial akhir dilakukan oleh penulis. Tanggung jawab penuh atas keakuratan, interpretasi, orisinalitas, dan integritas ilmiah makalah ini tetap berada pada penulis.

REFERENSI

- Alfonso, R., Andreo, P., Capote, R., Huq, M. S., Kilby, W., Kjäll, P., MacKie, T. R., Palmans, H., Rosser, K., Seuntjens, J., Ullrich, W., & Vatnitsky, S. (2008). A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. *Medical Physics*, 35(11), 5179–5186. <https://doi.org/10.1118/1.3005481>
- Alissa, M., Zink, K., Röser, A., Flatten, V., Schoenfeld, A. A., & Czarnecki, D. (2024). Monte Carlo calculated beam quality correction factors for high energy electron beams. *Physica Medica*, 117(1), 103179. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.103179>

- Almond, P. R., Biggs, P. J., Coursey, B. M., Hanson, W. F., Huq, M. S., Nath, R., & Rogers, D. W. O. (1999). AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Medical Physics*, 26(9), 1847–1870. <https://doi.org/https://doi.org/10.1118/1.598691>
- Bourgouin, A., Paz-Martín, J., Gedik, Y. C., Frei, F., Peier, P., Rossomme, S., et al. (2023). Charge collection efficiency of commercially available parallel-plate ionisation chambers in ultra-high dose-per-pulse electron beams. *Physics in Medicine and Biology*, 68(23), 235002.
- Burns, D. T., Ding, G. X., & Rogers, D. W. O. (1998). R 50 as a beam quality specifier for selecting stoppingpower ratios and reference depths for electron dosimetry. *Medical Physics*, 23(3), 383–388. <https://doi.org/10.1118/1.597893>
- Butler, D. J., & Healy, B. J. (2025). The contribution of the cable to the polarity effect in ionization chamber dosimetry. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 26, e70327. <https://doi.org/10.1002/acm2.70327>
- Calvo, F. A., Sole, C. V., Herranz, R., Lopez-Bote, M., Pascau, J., Santos, A., Muñoz-Calero, A., Ferrer, C., & Garcia-Sabrido, J. L. (2013). Intraoperative radiotherapy with electrons: Fundamentals, results, and innovation. *Ecancermedicalscience*, 7(1). <https://doi.org/10.3332/ecancer.2013.339>
- Claessens, M., Vanreusel, V., Gasparini, A., de Freitas Nascimento, L., Yalvac, B., Reniers, B., et al. (2024). Automated determination of the ion-recombination correction factor (k_{sat}) in ultra-high dose rate electron radiation therapy. *Medical Physics*, 51, 4536–4545.
- Das, I. J., Ding, G. X., & Ahnesjö, A. (2008). Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. In *Medical Physics* (Vol. 35, Number 1, pp. 206–215). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1118/1.2815356>
- Dewi, R. S., Limena, M., Kuncoro Sihono, D. S., Yadav, P., & Pawiro, S. A. (2026). Investigation of ion recombination and polarity effects in high dose rate electron beams. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 27, e70600. <https://doi.org/10.1002/acm2.70600>
- Erazo, F., Brualla, L., & Lallena, A. M. (2017). Computation of the electron beam quality k_Q factors for the NE2571, NE2571A and NE2581A thimble ionization chambers using PENELOPE. *Physica Medica*, 38, 76–80. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.05.053>
- Gibbons, J. P. (2020). *Khan's the Physics of Radiation Therapy (Sixth Edition)*. Wolters Kluwer Health.
- IAEA. (2000). *TECHNICAL REPORTS SERIES No. 398 - Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy*.
- IAEA. (2017). *Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination. Technical Reports Series No. 483*. <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- IAEA. (2024). *TECHNICAL REPORTS SERIES No. 398 (Rev. 1) Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy*.
- Inan, G., & Vefa Gul, O. (2026). Evaluation of dosimetric characteristics in small field electron beam parameters using different dosimeters. *Radiation Physics and Chemistry*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.113438>
- Ito, T., Kosaka, H., Yanagi, Y., Sakai, Y., & Monzen, H. (2025). Impact of extended source-to-surface distances and respiratory motion on the precision of electron beam therapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 26, e70301. <https://doi.org/10.1002/acm2.70301>
- Khan, F. M. (1991). *Clinical electron-beam dosimetry: report of Task Group No. 25, Radiation Therapy Committee, AAPM*. Published for the American Association of Physicists in Medicine by the American Institute of Physics.
- Kranzer, R., Poppinga, D., Weidner, J., Schüller, A., Hackel, T., Looe, H. K., et al. (2021). Ion collection efficiency of ionization chambers in ultra-high dose-per-pulse electron beams. *Medical Physics*, 48(2), 819–830.
- Lang, X., Hu, Z., Li, M., Tang, K., Li, J., Luo, F., et al. (2025). Dosimetric saturation effect study and correction calculation method of ionization chamber at ultra-high dose rate (FLASH). *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112344.
- Lee, U. S., Kim, S. W., Shin, J. B., Jeong, C., Goh, Y., Park, M. J., Kwak, J., Song, S. Y., & Cho, B. (2025). Intraoperative radiotherapy IORT applicators for treatment of small skin lesions a phantom and planning study. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89859-4>
- Liu, K., Holmes, S., Hooten, B., Schüller, E., & Beddar, S. (2024a). Evaluation of ion chamber response for applications in electron FLASH radiotherapy. *Medical Physics*, 51, 494–508.
- Liu, K., Holmes, S., Khan, A. U., Hooten, B., DeWerd, L., Schüller, E., et al. (2024b). Development of novel ionization chambers for reference dosimetry in electron FLASH radiotherapy. *Medical Physics*, 51, 9275–9289.
- Mahfirotin, D. A., Ferliano, B., Handika, A. D., Asril, Y. S., Fadli, M., Ryangga, D., Nelly, N., Kurniawan, E., Wibowo, W. E., & Pawiro, S. A. (2023). A multicenter study of modified electron beam output calibration. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/acm2.14232>
- McEwen, M., Dewerd, L., Ibbott, G., Followill, D., Rogers, D. W. O., Seltzer, S., Dewerd, L., Ibbott, G., &

- Followill, D. (2014). Addendum to the AAPM 's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. *Medical Physics*, 41(4). <https://doi.org/10.1118/1.4866223>
- Mihailescu, D., Pimpinella, M., Guerra, A. S., & Laitano, R. F. (2005). *COMPARISON OF MEASURED AND MONTE CARLO CALCULATED DOSE DISTRIBUTIONS FOR THE NOVAC7® LINEAR ACCELERATOR*.
- Motta, S., Dal Bello, R., Christensen, J. B., Bossin, L., & Yukihiro, E. G. (2024). Dosimetry of ultra-high dose rate electron beams using thermoluminescence and optically stimulated luminescence detectors. *Physics in Medicine and Biology*, 69(3), 035022.
- Muir, B., Davis, S., Dhanesar, S., Hillman, Y., Lakovenko, V., Kim, G. G.-Y., Alves, V. G. L., Lei, Y., Lowenstein, J., Renaud, J., Sarfehnia, A., Siebers, J., & Tantot, L. (2024). AAPM WGTG51 Report 385 : Addendum to the AAPM 's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy electron beams. *Medical Physics*, 51(6), 5840–5857. <https://doi.org/10.1002/mp.17277>
- Muir, B. R., & Rogers, D. W. O. (2014). Monte Carlo calculations of electron beam quality conversion factors for several ion chamber types. *Medical Physics*, 41(11), 1–15. <https://doi.org/10.1118/1.4893915>
- Palmiero, A., Liu, K., Colnot, J., Chopra, N., Neill, D., Connell, L., et al. (2025). On the acceptance, commissioning, and quality assurance of electron FLASH units. *Medical Physics*, 52, 1207–1223.
- Pawiro, S. A., Wibowo, W. E., & Assegab, M. I. (2022). Modified electron beam output calibration based on IAEA Technical Report Series 398. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23, 1–9. <https://doi.org/10.1002/acm2.13573>
- Paz-Martín, J., Schüller, A., Bourgouin, A., Gago-Arias, A., González-Castaño, D. M., Gómez-Fernández, N., et al. (2025). Evaluation of the two-voltage method for parallel-plate ionization chambers irradiated with pulsed beams. *Medical Physics*, 52, 4894–4909.
- Petersson, K., Jaccard, M., Germond, J. F., Buchillier, T., Bochud, F., Bourhis, J., et al. (2017). High dose-per-pulse electron beam dosimetry: A model to correct for the ion recombination in the Advanced Markus ionization chamber. *Medical Physics*, 44(3), 1157–1167.
- Podgorsak. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*.
- Poppinga, D., Kranzer, R., Farabolini, W., Gilardi, A., Corsini, R., Wyrwoll, V., et al. (2021). VHEE beam dosimetry at CERN Linear Electron Accelerator for Research under ultra-high dose rate conditions. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 7(1), 015012.
- Rustgi, S. N., & Working, K. R. (1992). Dosimetry of Small Field Electron Beams. *Medical Dosimetry*, 17(2), 107–110. [https://doi.org/10.1016/0958-3947\(92\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0958-3947(92)90023-9)
- Sempau, J., Andreo, P., Aldana, J., Mazurier, J., & Salvat, F. (2004). Electron beam quality correction factors for plane-parallel ionization chambers : Monte Carlo calculations using the PENELOPE system. *Physics in Medicine and Biology*, 49, 4427–4444. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/18/016>
- Yanagi, Y., Monzen, H., Kubo, K., Sugiyama, J., Noma, K., Ito, T., et al. (2023). Comparison of the characteristics of two types of parallel-plate ionization chamber under small-field electron irradiation. *Anticancer Research*, 43(5), 1967–1972.
- Zink, K., & Wulff, J. (2008). Monte Carlo calculations of beam quality correction factors kQ for electron dosimetry with a parallel-plate Roos chamber. *Physics in Medicine and Biology*, 53, 1595–1607. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/6/006>