

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi klinis dalam bidang radioterapi mengalami kemajuan yang pesat sebagai respons terhadap tingginya angka kematian akibat kanker. Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), lebih dari 50% penderita kanker memerlukan pengobatan radioterapi (Puspitasari et al., 2020; Suliman et al., 2023). Radioterapi merupakan salah satu metode pengobatan kanker yang bekerja dengan memanfaatkan radiasi pengion untuk membunuh sel-sel kanker dengan bantuan mesin pembangkit radiasi, seperti *Linear Accelerator* (Linac). Pesawat Linac mampu menghasilkan radiasi berenergi tinggi yang efektif dalam menargetkan dan membunuh tumor. Namun, tingginya tingkat radiasi yang dihasilkan juga dapat berpotensi menyebabkan efek paparan radiasi ke lingkungan sekitar termasuk pada pekerja radiasi dan masyarakat umum, sehingga diperlukan sistem proteksi radiasi yang memadai (Ibitoye et al., 2022).

Proteksi radiasi adalah upaya yang dilakukan untuk mengurangi dampak negatif dari paparan radiasi. Salah satu langkah utama dalam proteksi ini adalah memastikan desain ruangan radioterapi yang mampu menahan radiasi secara efektif. Dalam hal ini, dinding pelindung (*shielding*) menjadi komponen penting yang berfungsi untuk mengurangi laju dosis radiasi yang keluar dari ruang terapi (Tai et al., 2021; Winarno et al., 2021). Pesawat Linac dipasang di dalam bunker dengan dinding perisai primer dan sekunder sebagai bentuk proteksi radiasi. Perisai primer berfungsi untuk melemahkan intensitas sinar yang langsung mengenai dinding. Sedangkan, perisai sekunder dirancang untuk melindungi dari radiasi hamburan dan radiasi bocor pada area di sekitar bunker yang tidak terpapar langsung oleh berkas radiasi (Jangjoo & Ghiasi, 2019; Paez et al., 2024).

Secara umum, evaluasi perlindungan radiasi dilakukan dengan memantau laju dosis radiasi di luar dinding perisai pada energi maksimum pesawat menggunakan alat ukur radiasi, untuk mendapatkan nilai *Instantaneous Dose-Equivalent Rate* (IDR) sebagai laju dosis yang terukur pada titik tertentu. Namun, penggunaan IDR saja belum sepenuhnya mencerminkan kondisi operasional dan lingkungan radiasi di fasilitas secara akurat. Oleh karena itu, untuk memastikan efektivitas dinding perisai dalam menahan radiasi, penting untuk mempertimbangkan faktor beban kerja serta faktor penggunaan (IAEA, 2006).

Safety Report Series (SRS) 47 IAEA mengusulkan metode perhitungan dalam mengevaluasi efektivitas dinding perisai pada ruangan radioterapi, yang mencakup perhitungan laju dosis radiasi yang diterima individu di luar area penyinaran. Efektivitas dinding perisai dalam menahan radiasi bergantung pada beberapa faktor, seperti jenis material, ketebalan dinding, energi radiasi, dan beban kerja pesawat Linac (IAEA, 2006). Instalasi radioterapi dirancang untuk beroperasi sesuai dengan beban kerja pesawat terapi berdasarkan rekomendasi *National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP) No. 49, guna meningkatkan keselamatan radiasi dalam penggunaan radioterapi serta mengurangi paparan radiasi pada pekerja, masyarakat, dan lingkungan sekitar (NCRP, 1976).

Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 3 Tahun 2013 menetapkan bahwa Nilai Batas Dosis (NBD) untuk pekerja radiasi tidak boleh melebihi 20 mSv (millisievert) per tahun, dan untuk anggota masyarakat dibatasi maksimal 1 mSv per tahun (BAPETEN, 2013). Dengan demikian, dinding perisai harus dirancang sedemikian rupa agar laju dosis radiasi di luar ruangan tetap di bawah nilai tersebut. Namun, dalam praktiknya, fluktuasi beban kerja akibat variasi jumlah pasien dan penggunaan energi radiasi sering kali tidak dapat diprediksi secara sempurna. Oleh karena itu, pemantauan dan analisis berkala terhadap laju dosis radiasi menjadi sangat penting untuk memastikan keselamatan radiasi, terutama ketika beban kerja pesawat Linac mengalami perubahan yang signifikan.

Penelitian terkait evaluasi keselamatan radiasi melalui pemantauan laju dosis radiasi telah banyak berkembang. Diantaranya, penelitian yang dilakukan oleh Uddin dkk. (2024) mengenai evaluasi keselamatan dan penghalang radiasi pada fasilitas Linac melalui pengukuran laju dosis di luar dinding primer dan sekunder pada energi maksimum menggunakan *surveymeter*. Hasil yang diperoleh berupa nilai IDR maksimum dari setiap posisi gantry, dan menunjukkan nilai laju dosis yang terukur masih berada di bawah batas dosis yang diizinkan di lokasi tersebut (Uddin et al., 2024). Penelitian serupa dilakukan oleh Rahman dkk. (2023), melalui perhitungan desain ruangan radioterapi Linac dan pengukuran laju dosis radiasi di luar dinding perisai pada energi maksimum menggunakan persamaan dalam IAEA *Safety Report* No. 47 dan NCRP 151. Namun, pada kedua penelitian tersebut belum memberikan perhatian secara spesifik terhadap nilai beban kerja yang dilibatkan dalam mengevaluasi efektivitas dinding perisai (Rahman et al., 2023).

Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ramadhani dkk. (2020) berfokus pada estimasi laju dosis radiasi yang lolos melalui dinding primer dan sekunder berdasarkan beban kerja pesawat teleterapi Co-60. Dalam penelitian ini, beban kerja pesawat periode Januari-Juni 2019 digunakan untuk menghitung nilai estimasi laju dosis, yang kemudian dibandingkan dengan nilai dosis TLD pada pekerja radiasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai laju dosis masih berada di bawah batas dosis yang ditetapkan (Ramadhani et al., 2020).

Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan sebagai evaluasi proteksi radiasi pada ruangan pesawat radioterapi Linac melalui perhitungan laju dosis radiasi di luar dinding primer dan sekunder pada energi maksimum, dengan melibatkan beban kerja mesin Linac per minggu pada periode Januari hingga Agustus 2024. Metode perhitungan menggunakan persamaan analitik yang terdapat dalam *Safety Report Series 47* IAEA serta mengacu pada NBD Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2013. Perhitungan laju dosis dilakukan menggunakan data desain perisai ruangan Linac dan beban kerja mesin, kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran untuk menilai kemampuan dinding perisai dalam melindungi paparan radiasi individu di luar area penyinaran pada kondisi operasi maksimum.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin didapatkan dalam penelitian yaitu:

1. Menghitung beban kerja pesawat Linac per minggu selama periode Januari hingga Agustus 2024 berdasarkan pedoman NCRP No. 49.

2. Menganalisis nilai laju dosis radiasi di luar dinding perisai primer dan sekunder menggunakan metode perhitungan *Safety Report Series 47* IAEA.
3. Membandingkan nilai perhitungan laju dosis dengan pengukuran langsung pada kondisi penyinaran maksimum dan ditinjau berdasarkan Nilai Batas Dosis (NBD) yang diatur dalam Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2013.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai efektivitas dinding perisai khususnya dalam menahan radiasi pada kondisi operasi maksimum berdasarkan beban kerja Linac. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dan rekomendasi bagi pihak rumah sakit dalam memastikan keselamatan radiasi bagi pekerja, pasien, dan masyarakat di sekitar fasilitas radioterapi. Dengan demikian, penelitian ini memiliki peran penting dalam mendukung implementasi proteksi radiasi yang optimal sesuai standar keselamatan yang berlaku.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus sampai September 2024 di Instalasi Radioterapi Rumah Sakit TK. II Pelamonia Makassar.

2.2 Bahan dan Alat

2.2.1 Alat

1. Pesawat teleterapi *Linear Accelerator* (Linac) *TrueBeam*
2. Perangkat kontrol
3. *Surveymeter* Ludlum model 2363
4. Meteran

2.2.2 Bahan

1. *Slab phantom*
2. Data desain ruangan radioterapi

2.3 Metode Kerja

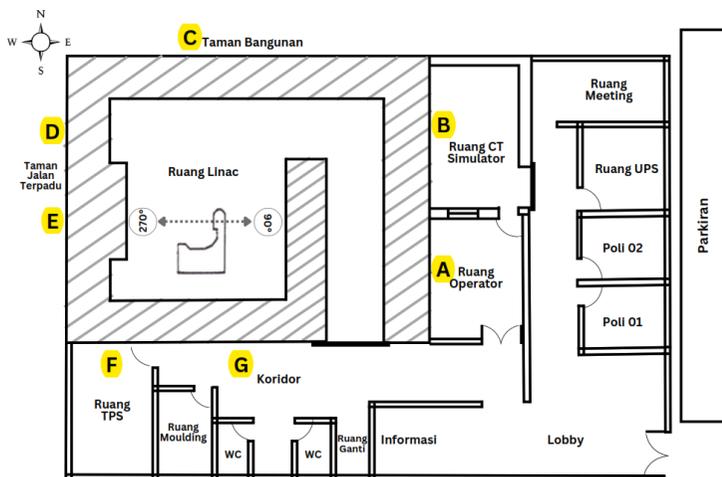
2.3.1 Pengumpulan Data

1. Data Penyinaran Pesawat Linac

Penelitian ini menggunakan beban kerja mingguan pesawat radioterapi Linac di Rumah Sakit Pelamonia Makassar pada periode Januari hingga Agustus 2024. Data yang dikumpulkan meliputi jumlah dosis penyinaran yang diberikan kepada pasien setiap lima hari kerja, kemudian diakumulasi untuk memperoleh total beban kerja per minggu. Sumber data yang digunakan merupakan data sekunder, yang diperoleh dari catatan operasional penyinaran yang terekam dalam sistem informasi rumah sakit.

2. Data Desain Instalasi Radioterapi

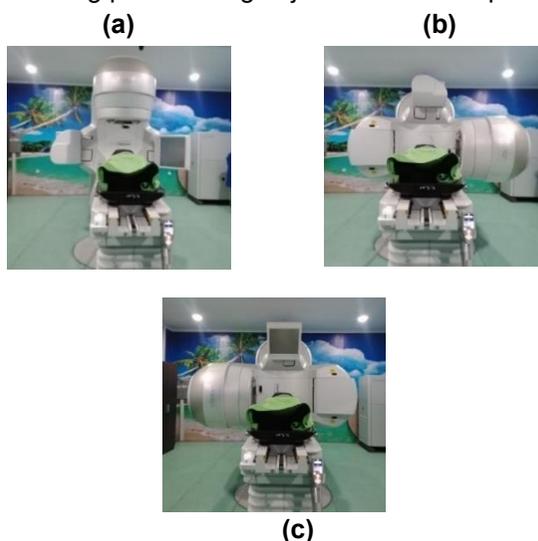
Berdasarkan data dokumentasi desain instalasi radioterapi, diperoleh informasi mengenai ketebalan masing-masing dinding perisai primer dan sekunder bunker Pesawat Linac. Selain itu, ditentukan pula titik-titik lokasi pengamatan paparan radiasi di luar dinding perisai, yang meliputi ruang operator (A), ruang CT Simulator (B), taman bangunan (C), taman Jalan Terpadu (D dan E), ruang TPS (F), serta koridor ruangan radioterapi (G), yang dapat dilihat pada Gambar 1. Selanjutnya, dilakukan pengukuran jarak dari sumber radiasi ke titik isocenter dan jarak sumber radiasi ke setiap dinding perisai menggunakan alat ukur berupa meteran. Titik pengamatan di luar dinding perisai diukur pada jarak 30 cm dari permukaan dinding.



Gambar 1. Desain instalasi radioterapi RS Pelamonia Makassar

3. Pengukuran *Instantaneous Dose-equivalent Rate* (IDR)

Pesawat Linac dan *slab phantom* disiapkan dan diletakkan di atas meja pemeriksaan, serta mengatur parameter penyinaran pada perangkat kontrol, yaitu sudut kolimator 45° , dan luas lapangan maksimum 40×40 cm. Sebelum perangkat Linac dioperasikan, laju dosis latar diukur menggunakan *surveymeter*. Penyinaran kemudian dilakukan dengan energi radiasi maksimum sebesar 10 MV dan posisi gantry diatur pada sudut 0° , 90° , dan 270° . Pengukuran laju dosis dilakukan menggunakan *surveymeter* pada setiap titik lokasi pengamatan di luar dinding perisai dengan jarak 30 cm dari permukaan luar dinding.



Gambar 2. Penyinaran Pesawat Linac (a) posisi gantry 0° (b) posisi gantry 90° , dan (c) posisi gantry 270°

2.3.2 Pengolahan Data

Laju dosis ekuivalen yang ditransmisikan di luar dinding penghalang primer (H_{Pri}) berdasarkan ketebalan yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan (1). Sementara itu, untuk penghalang sekunder, laju dosis yang diperoleh merupakan total dari laju dosis ekuivalen untuk radiasi bocor (H_{Leak}) dan radiasi hamburan (H_{Scat}), yang masing-masing dihitung dengan menggunakan persamaan (2) dan (3) (IAEA, 2006):

$$H_{pri} = \frac{B_{pri} WUT}{(d_{pri} + SAD)^2} \quad (1)$$

$$H_{leak} = \frac{B_{leak} (10^{-3}) WT}{(d_{leak})^2} \quad (2)$$

$$H_{scat} = \frac{B_{scat} a (F/400) WT}{(d_{sca})^2 (d_{sec})^2} \quad (3)$$

Ket.:

H : Laju dosis ekuivalen (mSv/week)

B : Faktor transmisi penghalang (*barrier*)

W : Beban kerja pesawat Linac (Gy/week)

U : Faktor pengguna

T : Faktor hunian

d : Jarak isocenter ke titik pengukuran (m)

a : Fraksi hamburan

F : Luas lapangan penyinaran (cm²)

Besar faktor transmisi penghalang dan beban kerja pesawat Linac yang akan dihitung untuk memperoleh perhitungan laju dosis pada dinding primer dan sekunder dapat ditentukan menggunakan persamaan-persamaan berikut (IAEA, 2006):

1. Faktor transmisi penghalang/*barrier* (B) dalam dinding perisai laju dosis radiasi menggambarkan seberapa besar kemampuan suatu material atau struktur (dinding perisai) untuk mengurangi atau menghalangi laju dosis radiasi yang melewati *barrier* tersebut.

$$-\log B = \frac{t}{TVL} \quad (4)$$

Ket. :

B : Faktor transmisi barrier

t : Tebal dinding perisai (m)

TVL : *Tenth value layer* (m)

Tenth value layer (TVL) merujuk pada ketebalan bahan tertentu yang dibutuhkan untuk mengurangi intensitas radiasi hingga sepersepuluh dari nilai semula. Dalam penelitian ini, lapisan TVL menggunakan penghalang dari beton dengan densitas 2350 kg·m⁻³. Nilai TVL yang digunakan didasarkan pada energi 10 MV yang tercantum dalam panduan *Safety Report Series 47* IAEA.

2. Beban kerja atau *workload* (W) pesawat radioterapi Linac mengacu pada jumlah total dosis radiasi yang diberikan oleh sistem linac dalam periode waktu tertentu atau jumlah total perawatan yang dilakukan dalam suatu periode.

$$W = X \left(\frac{SAD}{1} \right)^2 \quad (5)$$

Ket. :

W : Beban kerja pesawat (Gy.m²/minggu)

X : Jumlah dosis radiasi pasien mingguan (Gy/minggu)

SAD : Jarak sumber radiasi dengan titik isocenter (m)

Adapun dari hasil pengukuran laju dosis yang diperoleh menggunakan *survey meter* selanjutnya dikoreksi dengan mengurangi dosis latar yang telah diukur sebelumnya. Pengukuran ini kemudian dikalibrasi menggunakan faktor kalibrasi alat untuk mendapatkan laju dosis yang sesungguhnya, yang dihitung dengan menggunakan persamaan (6). Laju dosis yang diperoleh dari pengukuran ini menggambarkan laju dosis ekuivalen sesaat atau *Instantaneous Dose-equivalent Rate* (IDR).

$$IDR = (\dot{D}_U - \dot{D}_{Bg}) \times F_K \quad (6)$$

Ket. :

IDR : *Instantaneous dose rate* (μSv/h)

\dot{D}_U : Laju dosis ukur (μSv/h)

\dot{D}_{Bg} : Laju dosis *background* (μSv/h)

F_K : Faktor kalibrasi *survey meter* (μSv/h)

Namun, penggunaan IDR yang terukur dengan akselerator yang beroperasi pada keluaran maksimum tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasi dan lingkungan radiasi fasilitas yang sebenarnya. Oleh karena itu, akan lebih bermanfaat jika faktor beban kerja dan penggunaan dipertimbangkan bersama dengan IDR saat mengevaluasi kecukupan penghalang (NCRP, 2005). Untuk tujuan ini, konsep laju dosis ekuivalen rata-rata per minggu (TADR, R_w) yakni selama 40 jam kerja dalam satu minggu digunakan bersama dengan IDR yang diukur, guna memperoleh nilai laju dosis ekuivalen di luar dinding penghalang, yang dihitung melalui persamaan (7) dan (8).

$$R_w = \frac{IDR W U}{\dot{D}_0} \quad (7)$$

$$H = R_w \times T \quad (8)$$

Ket. :

IDR : *Instantaneous dose rate* (mSv/h)

R_w : *Time average dose-equivalent rate* (mSv/week)

\dot{D}_0 : Laju keluaran dosis di isocenter pada jarak 1 m dari sumber (Gy/h)

W : Beban kerja pesawat Linac (Gy/week)

U : Faktor pengguna

T : Faktor hunian

2.3.3 Analisis Data

Setelah data laju dosis diperoleh melalui perhitungan pada dinding primer dan sekunder, hasil pengukuran laju dosis radiasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik yang didapat dari analisis beban kerja dan faktor transmisi menggunakan persamaan 9 untuk mendapatkan nilai deviasi (IAEA, 2006). Kedua hasil ini kemudian akan dievaluasi berdasarkan Nilai Batas Dosis (NBD) untuk pekerja radiasi dan masyarakat yang

ditetapkan dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013. Evaluasi tersebut mempertimbangkan faktor hunian di setiap lokasi untuk memastikan bahwa penghalang radiasi cukup dan dosis yang diterima tetap berada dalam batas aman.

$$\text{Deviasi} = \frac{H_{\text{kalkulasi}} - H_{\text{pengukuran}}}{H_{\text{pengukuran}}} \times 100\% \quad (9)$$

Ket. :

$H_{\text{kalkulasi}}$: Laju dosis radiasi berdasarkan kalkulasi (mSv/week)

$H_{\text{pengukuran}}$: Laju dosis radiasi berdasarkan pengukuran (mSv/week)