

OA10

VERIFIKASI PAPARAN RADIASI TERHADAP DESAIN PERISAI RADIASI GAMMA KNIFE RADIOSURGERY

Mukhlisin

Direktorat Perizinan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif, Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jakarta
e-mail: r.mukhlisin@bapeten.go.id

ABSTRAK

VERIFIKASI PAPARAN RADIASI TERHADAP DESAIN PERISAI RADIASI GAMMA KNIFE RADIOSURGERY. Gamma Knife merupakan modalitas pengobatan *radiosurgery* untuk mendestruksi tumor di dalam otak tanpa harus melakukan tindakan pembedahan. Gamma Knife menghadirkan tantangan baru terhadap proteksi radiasi terutama desain perisai radiasi, hal ini terkait karakteristik sumber radiasi yang sangat *anisotropic* sehingga evaluasi terhadap perisai radiasi Gamma Knife bersifat cukup rumit dan unik. Bunker Gamma Knife harus didesain dan dibangun mengikuti ketentuan proteksi radiasi serta perlu dilakukan verifikasi pengukuran paparan radiasi di sekitar bunker untuk memastikan kecukupan pemenuhan persyaratan perisai radiasi. Makalah ini membahas verifikasi pengukuran paparan radiasi di sekitar ruang bunker Gamma Knife dikaitkan dengan hasil evaluasi perhitungan perisai radiasi bunker yang telah dilakukan oleh Evaluator BAPETEN. Verifikasi pengukuran paparan radiasi dilakukan terhadap Gamma Knife Perfexion™ dengan jumlah sumber radiasi Cobalt 60 sebanyak 192, aktivitas sumber pada saat pengukuran sebesar 5.092 Currie (Ci), ukuran kolimator maksimal 16 mm, jarak pengukuran setiap titik 30 cm dari dinding terluar bunker, dan pengukuran dilakukan dengan 4 mode penyinaran yaitu kondisi 1 (*idle-K_L*) tanpa fantom, kondisi 2 (*couch out-K_o*) tanpa fantom, kondisi 3 atau kondisi operasional penyinaran (*couch in-K_{in}*) tanpa fantom, dan kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) dengan fantom. Hasil verifikasi paparan radiasi mode penyinaran kondisi 1 (*idle-K_L*), kondisi 2 (*couch out-K_o*), dan kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) tanpa fantom menunjukkan bahwa nilai laju paparan terbesar adalah pada daerah pintu sebesar $0,116 \pm 0,04 \mu\text{Sv/jam}$. Adapun untuk mode penyinaran kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) dengan fantom diperoleh hasil bahwa nilai laju paparan terbesar berada pada daerah pintu dan bangunan *existing* yaitu masing-masing sebesar $0,153 \pm 0,040 \mu\text{Sv/jam}$ dan $0,151 \pm 0,01 \mu\text{Sv/jam}$. Nilai deviasi antara hasil kalkulasi dan hasil verifikasi paparan radiasi terhadap desain perisai radiasi tidak signifikan yaitu berkisar antara $0,03 - 0,99 \mu\text{Sv/jam}$, hal ini terjadi karena pada saat evaluasi perhitungan perisai radiasi diasumsikan bahwa aktivitas sumber sebesar 6.500 Ci, sedangkan pada saat dilakukan pengukuran paparan radiasi aktivitas sumbernya sebesar 5.092 Ci. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian antara hasil evaluasi perhitungan perisai radiasi dan hasil pengukuran paparan radiasi bunker dan bunker yang terbangun telah memenuhi persyaratan proteksi radiasi sebab nilai laju paparan di sekitar bunker berada di bawah *shielding design goal* dan nilai pembatas dosis (*dose constraint*).

Kata kunci: Gamma Knife Perfexion™, perisai radiasi, verifikasi paparan radiasi.

ABSTRACT

RADIATION SURVEY OF RADIATION SHIELDING DESIGN FOR GAMMA KNIFE RADIOSURGERY. Gamma Knife is radiosurgery treatment modality to destruct tumours in the brain without having surgery. Gamma Knife presents new challenges to radiation protection, especially the design of radiation shielding. It is related to the characteristics of the anisotropic radiation sources which caused the evaluation of Gamma Knife radiation shielding is quite complex and unique. The Gamma Knife bunker should be designed and built following the provisions of radiation protection, and it is necessary to verify the measurement of radiation exposure around bunker to ensure adequate compliance with radiation shielding requirements. This paper discusses the verification of radiation exposure measurements around Gamma Knife bunker room in relation with the evaluation result of bunker radiation shielding calculation done by BAPETEN Evaluator. Verification of radiation exposure measurements was performed on Gamma Knife Perfexion™ with a total of 192 Cobalt 60 radiation sources, source activity of 5.092 Ci at measurement time, maximum collimator size 16 mm, measurement distance of each point 30 cm from outer bunker wall. The measurement was performed with four modes of irradiation in which condition 1 (*idle-K_L*) without fantom, condition 2 (*couch out-K_o*) without fantom, condition 3 or operating exposure condition (*couch in-K_{in}*) without fantom, and condition 3 (*couch in-K_{in}*) with fantom. The verification results of radiation exposure modes of condition 1 (*idle-K_L*), condition 2 (*couch out-K_o*), and condition 3 (*couch in-K_{in}*) without fantom indicated that the largest exposure rate value was on the door area of $0.116 \pm 0.04 \mu\text{Sv/h}$. As for condition 3 (*couch in-K_{in}*) with fantom obtained that the highest rate of exposure was on the door and existing building area, which was $0.153 \pm 0.040 \mu\text{Sv/h}$ and $0.151 \pm 0.01 \mu\text{Sv/h}$ respectively. The deviation value between calculation and verification results of irradiation exposure on radiation shielding design is not significant, ranging from $0.03 - 0.99 \mu\text{Sv/h}$, this caused by radiation shield evaluation assumed the source activity was 6,500 Ci when actual measured radiation exposure of activity source was 5.092 Ci. Based on the verification result, it can be concluded that there is an agreement between evaluation result of radiation shield calculation and measurement result of bunker radiation

exposure and the built bunker has fulfilled the radiation protection requirement since the exposure rate value around bunker is below shielding design goal and dose constraint value.

Keywords: Gamma Knife RadiosurgeryTM, radiation shielding, radiation survey.

I. PENDAHULUAN

Gamma Knife merupakan salah satu modalitas pengobatan *radiosurgery* untuk mendestruksi tumor di dalam otak tanpa harus melakukan tindakan pembedahan. Pesawat Gamma Knife melakukan rekayasa radiasi gamma dengan menghasilkan pisau gamma berupa pisau bedah sinar gamma untuk merusak jaringan tumor yang mengakibatkan rusaknya sel tumor kemudian disusul dengan kematian sel tumor. Gamma Knife dipandang sebagai salah satu pengobatan terbaik tanpa efek samping untuk sejumlah kasus tumor di otak yang tidak mungkin diatasi dengan operasi. Disamping itu, Gamma Knife juga memberikan pilihan pengobatan untuk sejumlah kelainan di otak dengan risiko jauh lebih rendah dibandingkan dengan operasi. Oleh karena itu, teknologi pengobatan radiasi ini banyak digunakan di beberapa negara maju untuk mengobati beberapa tumor otak.^[1]

Gamma Knife memanfaatkan radiasi gamma yang berjumlah 192 berkas radiasi gamma yang akan meradiasi seluruh titik yang terdeteksi tumor dengan tujuan untuk merusak jaringan tumor tanpa menyebabkan kerusakan pada sel-sel sehat di sekitarnya. Penentuan area otak yang diperlukan untuk operasi Gamma Knife dilakukan melalui sejumlah pemeriksaan diagnostik, seperti *Magnetic Resonance Imaging (MRI)*, *CT-Scan* dan *Digital Substraction Angiography (DSA)*.

Modalitas Gamma Knife telah mengalami evolusi perkembangan teknologi dari model U, B, C, 4C sampai model terbaru yaitu *PerfexionTM*. Meskipun penampilan fisik desain eksternal setiap modelnya sangat berbeda akan tetapi desain internal profil dosisnya sedikit berbeda. Setiap unit Gamma Knife terdiri dari 6 (enam) komponen utama yaitu: sumber radiasi Cobalt 60, teknologi pemfokusan berkas radiasi, meja pemeriksaan (*couch*), sistem elektrik, panel kendali, dan *Treatment Planning System (TPS)*.^[2] Modifikasi distribusi dosis radiasi target dapat dicapai dengan menggunakan beberapa titik target (*isocenter*) dengan pengaturan ukuran kolimator yang berbeda, pembatasan berkas radiasi, atau sudut berkas radiasi yang berbeda. Akurasi pemberian dosis menggunakan Gamma Knife dihasilkan sekitar 0,25 milimeter, sedangkan akurasi mekanik kurang dari 0,3 mm.^[1]

Gamma Knife menghadirkan tantangan baru terhadap dunia proteksi radiasi yang berkaitan dengan pertimbangan desain perisai radiasi. Berdasarkan fakta bahwa perhitungan perisai radiasi Gamma Knife cukup rumit dan kompleks terkait karakteristik sumber radiasi yang sangat *anisotropic*. Evaluasi perisai radiasi untuk perangkat Gamma Knife ini bersifat unik, meskipun pabrikan memberikan data berupa kurva isodosis *Air Kerma Rate (AKR)* sebagai salah satu data AKR dalam

perhitungan perisai radiasi. Namun pihak pabrikan tidak melakukan perhitungan perisai radiasi untuk fasilitas Gamma Knife. Selain itu publikasi internasional NCRP No. 151 dan *Safety Reports Series IAEA No. 47* belum memuat perhitungan perisai radiasi Gamma Knife secara spesifik.^[2-4]

Permasalahan yang berhubungan dengan perisai radiasi Gamma Knife telah dilakukan investigasi dan dilaporkan oleh beberapa penulis, termasuk metode perhitungan perisai radiasinya.^[2-5] Saat ini modalitas *Leksell Gamma Knife PerfexionTM* (Elekta Instruments AB, Stockholm, Sweden) telah terpasang lebih dari 237 unit diseluruh dunia. Adapun di Indonesia telah terpasang 2 unit *Leksell Gamma Knife PerfexionTM*.

Penulis telah melakukan evaluasi dan analisis perhitungan perisai radiasi terhadap salah satu bunker Gamma Knife *PerfexionTM*. Setelah izin konstruksi bunker radioterapi Gamma Knife diterbitkan maka pesawat Gamma Knife dapat dipasang dalam bunker tersebut, selanjutnya BAPETEN akan melakukan verifikasi melalui survei paparan radiasi guna memastikan kecukupan perisai radiasi Gamma Knife yang terbangun dan mengevaluasi hasil perhitungan perisai radiasi sehingga dapat memastikan pemenuhan persyaratan proteksi radiasi sebelum izin operasi radioterapi Gamma Knife diberikan ke pemohon izin.

Makalah ini membahas verifikasi pengukuran paparan radiasi di sekitar bunker Gamma Knife dikaitkan dengan hasil evaluasi perhitungan perisai radiasi bunker Gamma Knife yang telah terbit izin konstruksinya, sehingga dapat diketahui kecukupan perisai radiasi Gamma Knife yang terbangun dalam memberikan proteksi radiasi terhadap pekerja radiasi dan anggota masyarakat.

Karya ini diharapkan dapat memberikan pedoman bagi pemohon izin, evaluator perizinan, dan inspektur BAPETEN mengenai pemenuhan persyaratan proteksi radiasi dalam desain bunker Gamma Knife ditinjau dari aspek perhitungan perisai radiasi dan verifikasi terhadap paparan radiasi bunker Gamma Knife.

II. METODOLOGI

II.1 Gamma Knife dan Aktivitas Sumber Radiasi

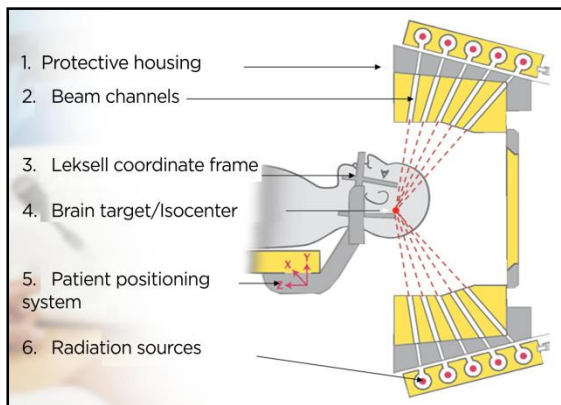
Modalitas Gamma Knife yang telah dilakukan evaluasi perhitungan perisai radiasinya yaitu Gamma Knife model *PerfexionTM* yang merupakan model terbaru dengan spesifikasi memiliki jumlah sumber Cobalt 60 sebanyak 192 dan menggunakan sistem kolimasi internal dengan *isocenter* ukuran 4 mm, 8mm, dan 16 mm. Sumber radiasi Cobalt 60 sejumlah 192 terdistribusi merata dalam cangkang bulat (*spherical shell*) disekitar pusat unit Gamma

Knife dengan ketinggian di atas permukaan lantai 1 meter.

Dalam hal perhitungan perisai radiasi Gamma Knife aktivitas sumber Co-60 diasumsikan sebesar 6.500 Currie. Hal ini sesuai dengan rekomendasi dari negara asal Gamma Knife (*Registry of Radioactive Sealed Sources and Devices. Safety evaluation of device no. GA-269-D-102-S. March 26,2001*) bahwa aktivitas maksimum yang diizinkan sebesar 6.600 Currie.^[5]



Gambar 1. Unit Gamma Knife PerfexionTM[6]



Gambar 2. Komponen Gamma Knife PerfexionTM[6]

Seiring peristiwa peluruhan sumber radioaktif Cobalt 60 maka tingkat laju paparan radiasi di sekitar bunker Gamma Knife akan menurun. Unit dan komponen Gamma Knife Perfexion dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.^[6]

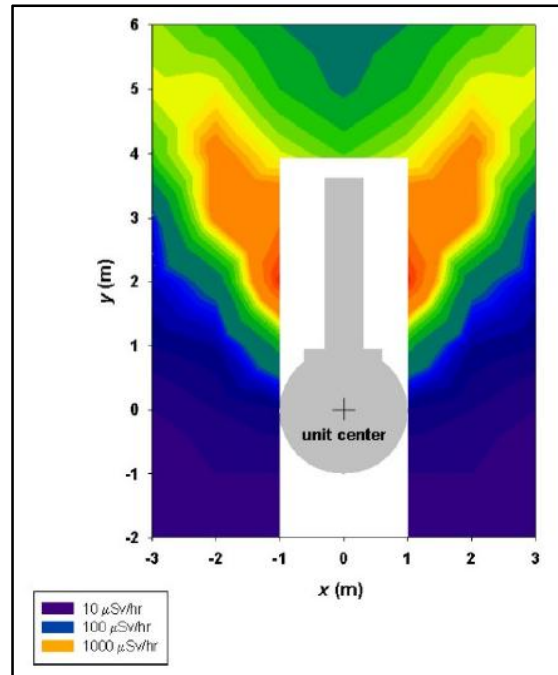
II.2 Perhitungan Kerma Udara (AKR)

Gamma Knife memiliki 3 (tiga) kondisi operasional: (i) **kondisi 1** yaitu jendela perisai radiasi tertutup, kondisi *idle* (K_L), (ii) **kondisi 2** yaitu jendela perisai radiasi terbuka saat meja pemeriksaan pasien bergerak masuk atau keluar (K_o), dan (iii) **kondisi 3** yaitu meja pemeriksaan dalam mode penyinaran pasien (K_{in}). Nilai AKR berada pada kondisi maksimum ketika jendela perisai radiasi dalam kondisi terbuka dan meja pemeriksaan keluar dari gantry Gamma Knife (K_o).

Nilai laju AKR ($\mu\text{Sv/jam}$) setiap grid spasi 1 meter pada kondisi 2 sekeliling unit Gamma Knife yaitu berada pada sumbu $y = -2$ m sampai $y = +6$ m, sumbu $x = -3$ m sampai $x = +3$ m, dan sumbu z

$= -1$ m sampai $z = +1,5$ m mengacu pada data hasil pengukuran yang diberikan oleh pabrik Elekta Swedense seperti diilustrasikan dalam Gambar 3.^[5]

Dalam hal mencari nilai laju AKR untuk kondisi K_{in} menggunakan Persamaan (1). Nilai AKR K_{in} memegang peranan penting dalam perhitungan perisai radiasi Gamma Knife meskipun AKR K_{in} nilainya lebih kecil dibandingkan nilai AKR K_o .



Gambar 3. Diagram laju AKR ($\mu\text{Sv/jam}$) bidang horizontal ($z=0$) sekeliling unit Gamma Knife dalam kondisi K_o dengan aktivitas sumber 6.500 Ci.^[5]

$$K_{in} = K_o x f(\theta) \tag{1}$$

f merupakan faktor transmisi untuk meja pemeriksaan (*couch*) dan komponen yang melekat pada *couch*, sedangkan (θ) merupakan sudut antara sumbu axis y dan garis radial ke titik proteksi radiasi ($\text{Cos } \theta = \frac{y}{r}$, r merupakan jarak dari titik isocenter). Nilai $f(\theta)$ untuk setiap sudut dapat dilihat pada Tabel 1.

Saat jendela perisai radiasi tertutup dan unit dalam keadaan *idle*, satu-satunya radiasi yang keluar adalah radiasi bocor melalui perisai radiasi. Kondisi seperti ini dinotasikan dalam K_L ($\mu\text{Sv/jam}$). Nilai konservatif untuk K_L adalah $10 \mu\text{Sv/jam}$ dengan asumsi nilai kebocoran berada pada jarak $0,9 \text{ m} + 0,6 \text{ m} = 1,5 \text{ m}$ dari pusat unit Gamma Knife. Formulasi untuk mencari nilai K_L mengacu pada Persamaan (2).

Tabel 1. Nilai faktor f

θ (derajat)	f
0	0,83
5	0,80
10	0,74
15	0,68
20	0,61
30	0,46
40	0,37
45	0,35
50	0,34
55	0,34
60	0,37
70	0,47
75	0,50
70	0,50

$$K_L = 10 \left(\frac{1,5 m^2}{r^2} \right) \mu Sv/jam \quad (2)$$

r merupakan jarak (m) dari pusat isocenter ke titik proteksi radiasi.

II.3 Shielding Design Goal dan Beban Kerja

Shielding design goal (P) untuk pekerja radiasi (daerah pengendalian) menggunakan nilai 0,2 mSv/minggu dan untuk anggota masyarakat (daerah supervisi) menggunakan nilai 0,01 mSv/minggu. Nilai P tersebut mengacu pada NCRP 151 dan menerapkan 2 (dua) kali margin keselamatan.^[4] Bangunan fasilitas radioterapi harus didesain sesuai dengan persyaratan proteksi radiasi sehingga paparan radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi dan anggota masyarakat memenuhi ketentuan pembatas dosis sebagaimana tertuang dalam Pasal 41 Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013.^[7] Faktor T (*Occupancy Factor*) ditentukan berdasarkan tingkat hunian suatu daerah yang akan diproteksi. Nilai T mengacu pada Tabel B.1 NCRP 151.^[4]

Beban kerja (*Workload*) mengikuti rekomendasi pabrikan Gamma Knife Elekta, meja pemeriksaan (*couch*) diasumsikan bergerak masuk (*in*) dan keluar (*out*) gantry rata-rata 4 (empat) kali untuk setiap penyinaran pasien. Setiap gerakan membutuhkan waktu 40 - 60 detik dan setiap penyinaran diasumsikan memakan waktu 30 menit. Output dosis pada pusat *polystyrene* diameter 16 cm kira-kira sebesar 3,5 Gy/menit untuk aktivitas sumber 6.500 Ci. Oleh karena itu, skenario dosis preskripsi yang digunakan dalam perhitungan perisai radiasi adalah 25 Gy.

Diasumsikan hanya 1 pasien yang dilakukan pengobatan selama 1 jam tertentu, jendela perisai radiasi akan terbuka dan meja pemeriksaan (*couch*) keluar gantry (kondisi 2) untuk periode maksimal $4 \times 2 = 8$ menit. Jika 4 pasien diasumsikan diberikan penyinaran setiap hari, 5 hari per minggu, maka jendela perisai radiasi akan terbuka dan meja pemeriksaan (*couch*) keluar gantry untuk total waktu 2,7 jam per minggu. Tingkat radiasi akan menurun

karena aktivitas sumbernya meluruh; namun, waktu untuk memindahkan meja pemeriksaan (*couch*) masuk dan keluar gantry tetap konstan, dan oleh karena itu kontribusi tingkat radiasi dari status operasional 2 akan menurun seiring waktu.

Berdasarkan asumsi bahwa 4 pasien dilakukan penyinaran setiap hari selama 30 menit per pasien, maka beban kerja untuk kondisi operasional 3 sebesar 10 jam per minggu. Ketika aktivitas sumber meluruh maka nilai AKR akan menurun; namun, waktu penyinaran akan meningkat secara proporsional, dan oleh karena itu kontribusi dosis mingguan pada operasional kondisi 3 akan tetap konstan seiring waktu. Nilai acuan beban kerja Gamma Knife tertera dalam Tabel 2.^[5]

Nilai laju dosis ekivalen mingguan dalam satuan $\mu Sv/minggu$ dihitung dengan menggunakan Persamaan (3).^[5]

$$K = 40K_L + 2,7K_o + 10K_{in} \quad (3)$$

Tabel 2. Beban kerja Gamma Knife^[5]

Kondisi Operasi	Beban Kerja (jam/minggu)
Kondisi 1 (<i>idle</i>)	40
Kondisi 2 (<i>couch out</i>)	2,7
Kondisi 3 (<i>couch in</i>)	10

Tabel 3. Nilai TVL dan HVL untuk Cobalt 60^[4]

	Beton (Concrete)	Baja (Steel)	Pb (Lead)
HVL (cm)	6,2	2,1	1,2
TVL (cm)	21	7	4

II.4 Perhitungan Perisai Radiasi Gamma Knife

Perhitungan perisai radiasi Gamma Knife didasarkan pada dokumen gambar desain bunker Gamma Knife yang telah diajukan oleh pemohon izin.^[8] Berdasarkan Pasal 5 huruf e Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013 bahwa gambar desain bunker Radioterapi adalah gambar dalam bentuk cetak biru skala paling kurang 1:50 (satu berbanding lima puluh) dengan 3 (tiga) penampang lintang (tampak depan, samping, dan atas), dan penggunaan ruang sekitarnya^[7] seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.^[9]

Metode untuk melakukan perhitungan perisai radiasi menggunakan formulasi seperti tertera dalam Persamaan (4).^[3-5]

$$B = \frac{P}{KT} \quad (4)$$

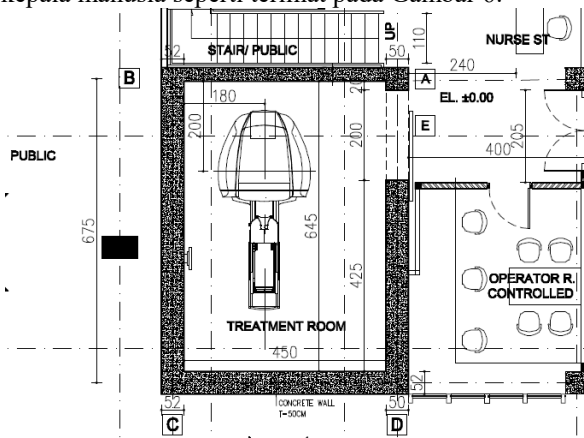
P merupakan tingkat radiasi yang diizinkan selama periode tertentu (*shielding design goal*), B adalah faktor transmisi perisai radiasi, K adalah Kerma udara pada titik proteksi radiasi, dan T merupakan faktor okupansi. Selanjutnya tebal perisai radiasi (t) dihitung menggunakan Persamaan (5).^[3-5]

$$t = -TVL \times \log(B) \tag{5}$$

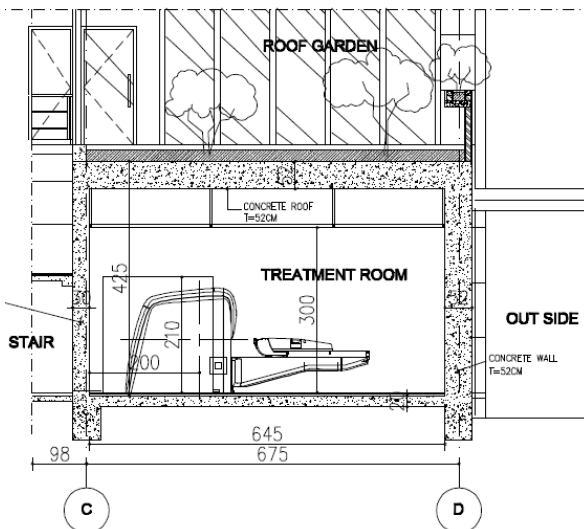
TVL adalah tebal sepersepuluh perisai radiasi untuk bahan perisai yang digunakan. Nilai TVL material beton, baja, dan Pb untuk sumber radiasi Co-60 tertera dalam Tabel 3.^[4]

II.5 Pengukuran Paparan Radiasi di Sekitar Bunker Gamma Knife

Pengukuran paparan radiasi terhadap bunker Gamma Knife dilakukan menggunakan surveymeter merk RadEye™ PRD ER nomor seri 30881 dan 30885 (ThermoScientific™) yang telah terkalibrasi oleh Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN. Fantom kepala (Leksell Gamma Knife™) diletakkan di isocenter berkas utama sebagai media penghambur yang merepresentasikan kepala manusia seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 4. Blueprint bunker Gamma Knife (as built drawing) skala 1:50 penampang lintang tampak atas.^[9]

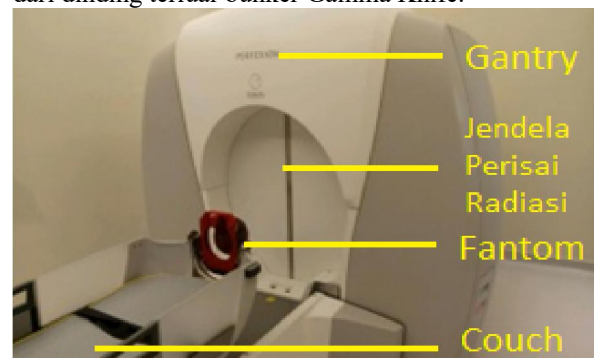


Gambar 5. Blueprint bunker Gamma Knife (as built drawing) skala 1:50 penampang lintang tampak samping.^[9]

Survei paparan radiasi diukur pada kondisi aktivitas sumber Cobalt 60 sebesar 5.799 Ci (per tanggal 1 April 2017; 192 sumber) dan ukuran

kolimator dibuka maksimal yaitu 16 mm. Pengukuran paparan radiasi dilakukan pada kondisi operasional Gamma Knife kondisi 1 (K_L) tanpa fantom, kondisi 2 (K_o) tanpa fantom, kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom dan tanpa fantom.

Pengukuran paparan radiasi pada kondisi 1 (K_L), kondisi 2 (K_o), dan kondisi 3 (K_{in}) tanpa fantom dilakukan di ruang operator (titik D-E), tangga (titik A-B), dan pintu (titik A-E), sedangkan untuk pengukuran paparan radiasi pada kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom dilakukan di ruang operator (titik D-E), tangga (titik A-B), pintu (titik A-E), taman (titik C-D), atap, lorong (ruang antara bunker – bangunan existing (B-C)), dan kantin. Pengukuran paparan radiasi diukur disetiap titik pengukuran dengan metode 3 (tiga) kali pengukuran di titik yang berdekatan, adapun jarak pengukuran adalah 30 cm dari dinding terluar bunker Gamma Knife.



Gambar 6. Setting Gamma Knife dan fantom pada saat pengukuran paparan radiasi.

Hasil pengukuran paparan radiasi (survei radiasi) yang diperoleh dari berbagai titik pengukuran dan beberapa kondisi penyinaran akan dilakukan perbandingan dengan hasil perhitungan akan dilakukan evaluasi dan analisis mengenai bunker Gamma Knife sehingga dapat diambil kesimpulan mengenai kecukupan bunker Gamma Knife dalam pemenuhan persyaratan proteksi radiasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Makalah ini mendiskusikan tentang hasil verifikasi pengukuran paparan radiasi di sekitar bunker Gamma Knife Perfexion™ untuk menguji perisai radiasi (shielding) Gamma Knife dalam pemenuhan persyaratan proteksi radiasi. Disamping itu, survei radiasi dilakukan untuk menguji kebenaran hasil kalkulasi evaluasi perisai radiasi yang telah dilaksanakan dalam rangka proses perizinan konstruksi bunker radioterapi Gamma Knife. BAPETEN sebagai Badan Pengawas Tenaga Nuklir di Indonesia, memiliki tugas untuk melakukan verifikasi terhadap permohonan izin operasi radioterapi sebelum izin operasi diterbitkan, salah satu parameter verifikasi adalah pengukuran paparan radiasi (survei radiasi) untuk memastikan kecukupan desain bunker Gamma Knife dalam pemenuhan

persyaratan proteksi radiasi bagi pekerja radiasi dan publik serta lingkungan.

Pesawat Gamma Knife Perfexion™ didesain memiliki penahan radiasi primer (*self Shielded*) dari sumber radiasi Cob-60 dan kolimator penyinaran didesain sedemikian rupa sehingga diharapkan saat penyinaran pasien tidak ada radiasi primer yang mengarah keluar gantry Gamma Knife. Dalam prakteknya terdapat 3 kondisi operasional yaitu kondisi (1) jendela perisai radiasi tertutup (*idle/beam Off*), suatu keadaan jendela gantry tertutup dan semua sumber Co-60 pada posisi terkunci di penahan radiasi, kondisi (2) jendela perisai radiasi terbuka dengan meja pemeriksaan (*couch*) bergerak masuk dan keluar gantry (*beam On*), suatu keadaan jendela perisai radiasi terbuka penuh dan *couch* bergerak keluar dan ke dalam gantry, dan kondisi (3) meja pemeriksaan dalam kondisi penyinaran pasien, suatu keadaan jendela perisai radiasi terbuka penuh, *couch* dalam posisi penyinaran dan posisi sumber Co-60 selaras dengan kolimator.

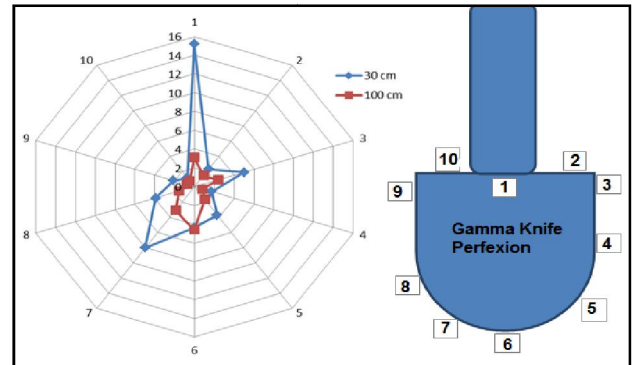
Pertimbangan dalam perhitungan perisai radiasi Gamma Knife melibatkan 3 (tiga) kondisi operasional yaitu (i) jendela perisai radiasi tertutup atau kondisi *idle* (K_L), (ii) jendela perisai radiasi terbuka saat meja pemeriksaan pasien bergerak masuk atau keluar gantry (K_o), dan (iii) meja pemeriksaan dalam mode penyinaran pasien (K_{in}). Nilai laju AKR untuk kondisi K_{in} memegang peranan penting dalam perhitungan perisai radiasi meskipun AKR K_{in} nilainya lebih kecil dibandingkan nilai AKR K_o .

Nilai AKR hasil pengukuran pada jarak 30 cm dan 1 m pada kondisi 1 (K_L) ditunjukkan dalam Tabel 4 dan Gambar 7. Hasil pengukuran AKR K_L menunjukkan bahwa nilai terbesar diperoleh pada daerah jendela perisai radiasi yaitu sebesar 15,2 $\mu\text{Sv/jam}$ (jarak 30 cm). Hal ini terjadi karena jendela perisai radiasi merupakan daerah yang dapat dibuka dan ditutup untuk keluar masuknya *couch*. Nilai AKR hasil pengukuran lebih rendah apabila dibandingkan dengan data nilai AKR dari pabrikan Elekta yaitu sebesar 15,6 $\mu\text{Sv/jam}$ karena aktivitas sumber Co-60 yang digunakan adalah 6.500 Ci sedangkan aktivitas sumber pada saat dilakukan pengukuran adalah 5.092 Ci (per 28 Maret 2018).

Perhitungan perisai radiasi menggunakan asumsi jumlah pasien per hari 4 pasien, lama penyinaran setiap hari selama 30 menit per pasien sehingga nilai beban kerja untuk K_{in} sebesar 10 jam per minggu, K_o sebesar 2,7 jam per minggu dan K_L sebesar 40 jam per minggu. Beban kerja untuk *acceptance test* dan *commissioning test* tidak lebih besar dari yang diasumsikan untuk penyinaran terhadap 20 pasien per minggu. Adapun untuk kegiatan jaminan mutu (QC) mingguan diperkirakan memerlukan beban kerja yang setara dengan 1 pasien, atau sekitar 1/80 dari beban pasien bulanan, oleh karena itu beban kerjanya dapat diabaikan.

Tabel 4. Nilai AKR pada kondisi kondisi 1 (K_L)

Jarak (cm)	Laju Paparan ($\mu\text{Sv/jam}$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	15,2	2,3	5,0	1,7	3,7	4,4	8,0	3,9	2,13	1,17
100	3,1	1,5	2,7	0,8	1,7	4,6	3,0	1,5	0,76	0,8

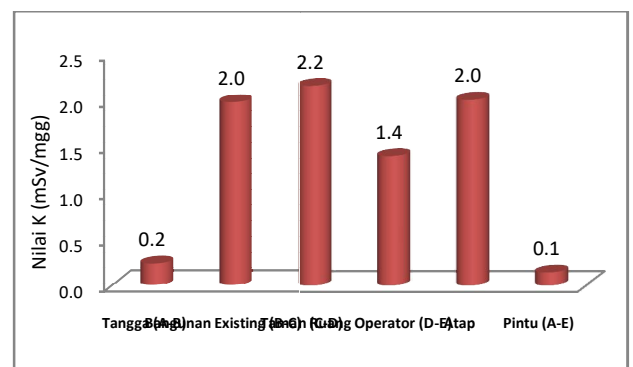


Gambar 7. Grafik nilai AKR pada kondisi 1 (K_L).

Nilai laju dosis ekivalen mingguan yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) tertera dalam Tabel 5 dan Gambar 8. Selanjutnya, hasil perhitungan tebal perisai radiasi beton (*concrete*) dengan menggunakan Persamaan (5) dan Persamaan (5) dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 9.

Tabel 5. Nilai dosis ekivalen K (mSv/minggu)

Area	K_L	K_o	K_{in}	K
	$\mu\text{Sv/jam}$			(mSv/mgg)
Tangga (A-B)	4,3	5,0	2,5	0,2
Bangunan Existing (B-C)	4,3	122,0	74,4	2,0
Taman (C-D)	0,9	110,0	91,3	2,2
Ruang Operator (D-E)	2,2	75,0	55,5	1,4
Atap	2,1	110,0	81,4	2,0
Pintu (A-E)	2,2	4,0	2,0	0,1

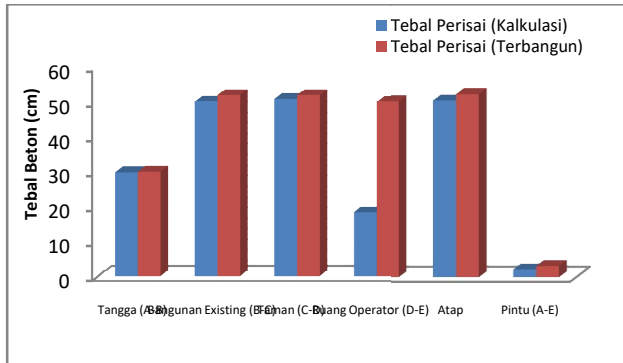


Gambar 8. Grafik nilai dosis ekivalen K (mSv/mgg)

Tabel 6. Tebal perisai radiasi bunker Gamma Knife

Area	P	r	Perhitungan Perisai (cm)	Perisai Terbangun (cm)
	(mSv/mgg)	(cm)		
Tangga	0,01	230	29,8	30
Bangunan Existing	0,01	230	50,1	52

Taman	0,01	495	50,9	52
Ruang Operator	0,2	320	18,4	50
Atap	0,01	325	50,2	52
Pintu (<i>Steel</i>)	0,2	320	2,14	3,15



Gambar 9. Grafik tebal perisai hasil perhitungan dan tebal perisai terbangun.

Grafik tebal perisai Gamma Knife menunjukkan bahwa tebal perisai antara hasil kalkulasi dan perisai radiasi yang terbangun pada daerah tangga, bangunan *existing*, taman, dan atap tebalnya hampir sama, akan tetapi untuk daerah ruang operator dan pintu tebal perisai yang terbangun lebih tebal dibandingkan dengan hasil kalkulasi, yaitu hasil perhitungan tebal perisai radiasi untuk ruang operator adalah 18,4 cm akan tetapi perisai radiasi yang terbangun adalah 50 cm. Demikian juga untuk pintu, tebal perisai radiasi dengan bahan baja (*steel*) hasil perhitungan adalah 2,14 cm akan tetapi yang terbangun tebalnya 3,15 cm.

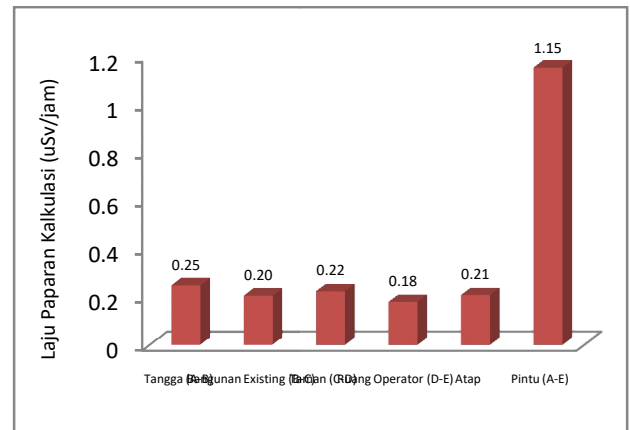
Hasil perhitungan laju paparan didasarkan pada perisai radiasi yang terbangun didapatkan nilai laju paparan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 10. Grafik nilai laju paparan tersebut menunjukkan bahwa nilai laju paparan terkecil berada pada daerah ruang operator yaitu sebesar 0,177 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dan nilai laju paparan terbesar berada pada daerah pintu yaitu sebesar 1,149 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$.

Hasil pengukuran paparan radiasi pada kondisi 1 (K_L), kondisi 2 (K_o), dan kondisi 3 (K_{in}) tanpa fantom yang dilakukan di ruang operator, tangga, dan pintu tertera dalam Tabel 8 dan Gambar 11. Adapun hasil pengukuran paparan radiasi pada kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom di ruang operator, tangga, pintu, atap, lorong (ruang antara bunker – bangunan *existing* dan kantin tertera dalam Tabel 9 dan Gambar 12.

Tabel 7. Laju paparan radiasi hasil perhitungan berdasar tebal perisai terbangun

Area	Kalkulasi Laju Paparan ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)
Tangga (A-B)	0,245
Bangunan <i>Existing</i> (B-C)	0,204
Taman (C-D)	0,222
Ruang Operator (D-E)	0,177

Atap	0,206
Pintu (A-E)	1,149



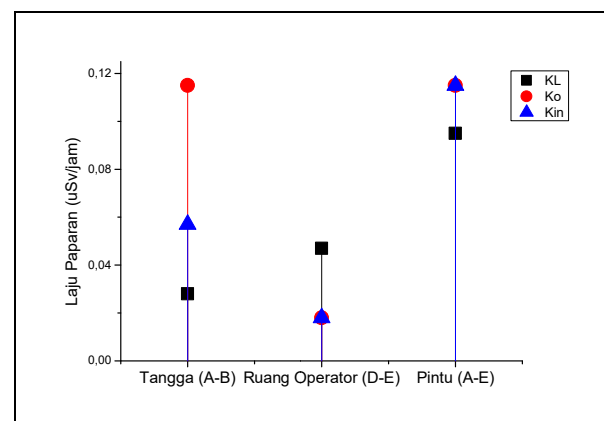
Gambar 10. Grafik nilai laju paparan hasil perhitungan berdasar tebal perisai terbangun

Tabel 8. Hasil pengukuran laju paparan radiasi kondisi 1 (K_L), kondisi 2 (K_o), dan kondisi 3 (K_{in}) tanpa fantom.

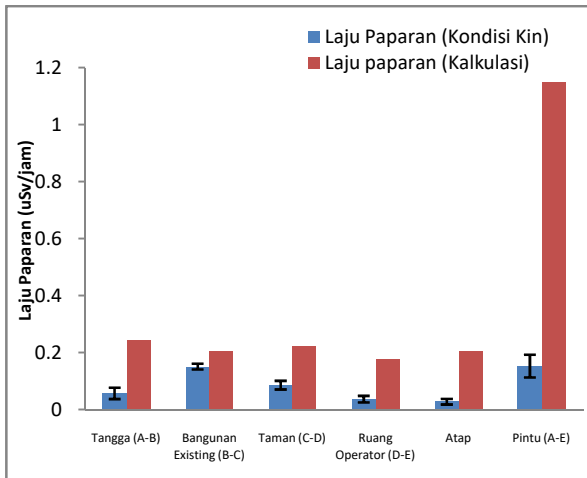
Area	K_L ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	K_o ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	K_{in} ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)
Tangga (A-B)	0,028 \pm 0,02	0,115 \pm 0,03	0,057 \pm 0,01
R. Operator (D-E)	0,047 \pm 0,03	0,018 \pm 0,03	0,018 \pm 0,04
Pintu (A-E)	0,095 \pm 0,02	0,116 \pm 0,04	0,115 \pm 0,04

Tabel 9. Hasil pengukuran laju paparan radiasi kondisi kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom

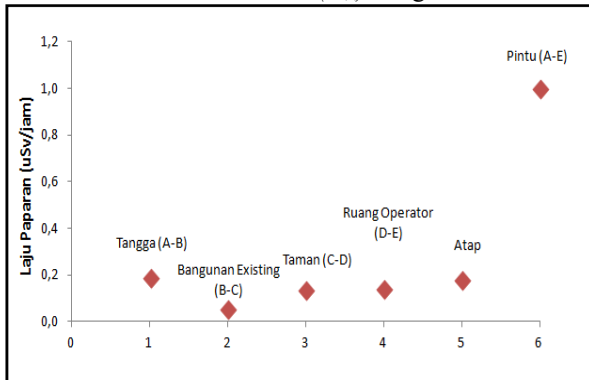
Area	Laju Paparan (Kondisi K_{in}) $\mu\text{Sv}/\text{jam}$	Laju paparan (Kalkulasi) $\mu\text{Sv}/\text{jam}$
Tangga (A-B)	0,057 \pm 0,02	0,245
Bangunan <i>Existing</i> (B-C)	0,151 \pm 0,01	0,204
Taman (C-D)	0,086 \pm 0,015	0,222
Ruang Operator (D-E)	0,037 \pm 0,012	0,177
Atap	0,028 \pm 0,010	0,206
Pintu (A-E)	0,153 \pm 0,040	1,149



Gambar 11. Grafik hasil pengukuran laju paparan radiasi kondisi 1 (K_L), kondisi 2 (K_o), dan kondisi 3 (K_{in}) tanpa fantom.



Gambar 12. Grafik Hasil pengukuran laju paparan radiasi kondisi kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom



Gambar 13. Grafik nilai deviasi antara hasil kalkulasi dan hasil verifikasi paparan radiasi

Berdasarkan nilai laju paparan sebagaimana disebutkan dalam Tabel 8 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai AKR K_o untuk daerah tangga, ruang operator, dan pintu masing-masing sebesar $0,115 \pm 0,03 \mu\text{Sv/jam}$, $0,018 \pm 0,03 \mu\text{Sv/jam}$, dan $0,116 \pm 0,04 \mu\text{Sv/jam}$, sedangkan nilai AKR K_{in} masing-masing adalah $0,057 \pm 0,01 \mu\text{Sv/jam}$, $0,018 \pm 0,04 \mu\text{Sv/jam}$, dan $0,115 \pm 0,04 \mu\text{Sv/jam}$. Hasil verifikasi paparan radiasi mode penyinaran kondisi 1 (*idle-K_L*), kondisi 2 (*couch out-K_o*), dan kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) tanpa fantom menunjukkan bahwa nilai laju paparan terbesar adalah daerah pintu sebesar $0,116 \pm 0,04 \mu\text{Sv/jam}$. Nilai laju paparan radiasi kondisi 2 (*couch out-K_o*) paling besar dibandingkan dengan kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) hal ini sesuai dengan teori bahwa nilai AKR K_{in} lebih kecil dibandingkan nilai AKR K_o dengan formulasi $K_{in} = K_o \cdot f(\theta)$.

Nilai laju paparan sebagaimana disebutkan dalam Tabel 9 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa untuk mode penyinaran kondisi 3 (*couch in-K_{in}*) dengan fantom diperoleh hasil bahwa nilai laju paparan terbesar berada pada daerah pintu dan

bangunan *existing* yaitu masing-masing sebesar $0,153 \pm 0,040 \mu\text{Sv/jam}$ dan $0,151 \pm 0,01 \mu\text{Sv/jam}$, seperti terlihat pada Tabel 9 dan Gambar 12.

Nilai deviasi antara hasil kalkulasi dan hasil verifikasi paparan radiasi terhadap desain perisai radiasi tidak signifikan yaitu berkisar antara $0,03 - 0,99 \mu\text{Sv/jam}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 13, hal ini terjadi karena pada saat evaluasi perhitungan perisai radiasi diasumsikan bahwa aktivitas sumber sebesar 6.500 Ci sedangkan pada saat dilakukan pengukuran aktivitas sumbernya sebesar 5.092 Currie. Dapat disimpulkan bahwa terdapat kesesuaian antara hasil evaluasi perhitungan perisai radiasi dan hasil verifikasi paparan radiasi bunker Gamma Knife telah memenuhi persyaratan proteksi radiasi yaitu nilai laju paparan di sekitar bunker berada di bawah *shielding design goal* yang telah ditetapkan oleh pemohon izin dan nilai pembatas dosis (*dose constraint*) yang telah ditetapkan oleh BAPETEN serta nilai *instantaneous dose rate* (IDR) yaitu $7,5 \mu\text{Sv/jam}$ untuk pekerja radiasi dan dibawah $7,5 \mu\text{Sv/jam}$ untuk anggota masyarakat.^[2]

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil verifikasi di fasilitas Gamma Knife *radiosurgery* dapat disimpulkan bahwa:

- Perhitungan perisai radiasi bunker Gamma Knife harus memperhatikan *as built drawing*, model Gamma Knife, aktivitas sumber radiasi Co-60, AKR (K_L , K_o , dan K_{in}), beban kerja, *shielding design goal*, dan jenis material yang digunakan.
- Nilai AKR K_{in} memegang peranan penting dalam perhitungan perisai radiasi meskipun AKR K_{in} nilainya lebih kecil dibandingkan nilai AKR K_o ;
- Pengukuran paparan radiasi diukur pada kondisi ukuran kolimator terbuka maksimal dan dilakukan pada kondisi operasional Gamma Knife kondisi 1 (K_L) tanpa fantom, kondisi 2 (K_o) tanpa fantom, kondisi 3 (K_{in}) dengan fantom dan tanpa fantom;
- Hasil verifikasi menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian antara hasil evaluasi perhitungan perisai radiasi dan hasil pengukuran paparan radiasi; dan
- Bunker Gamma Knife yang terbangun telah memenuhi persyaratan proteksi radiasi sebab nilai laju paparan di sekitar bunker berada di bawah *shielding design goal* dan *dose constraint* yang telah ditetapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- J. Ganz, *Gamma knife neurosurgery*: Springer Science & Business Media, 2010.
- IAEA, "Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities," *Safety Reports Series No. 47*, 2006.

- [3] P. H. McGinley, *Shielding techniques for radiation oncology facilities*: Medical Physics Madison, 2002.
- [4] NCRP, "Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities," *National Council on Radiation Protection and Measurements No. 151*, 2005.
- [5] P. N. McDermott, "Radiation shielding for gamma stereotactic radiosurgery units," *Journal of applied clinical medical physics*, vol. 8, pp. 147-157, 2007.
- [6] <https://www.elekta.com/radiosurgery/leksell-gamma-knife-perfection.html>.
- [7] BAPETEN, "Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Radioterapi," *JDIH BAPETEN*, 2013.
- [8] G. K. R. C. RSCM, "Perhitungan Perisai Radiasi Gamma Knife," *Izin Konstruksi Radioterapi Gamma Knife*, 2016.
- [9] G. K. R. C. RSCM, "Blueprint Bunker Gamma Knife," *Izin Konstruksi Radioterapi Gamma Knife*, 2016.