



## Kajian pemantauan dosis neutron terhadap pekerja radiasi pada pengoperasian Linac dengan energi foton $\geq 10$ MV

Leily Savitri<sup>1</sup>, Iswandarini<sup>1</sup>, Rusmanto<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif, BAPETEN, Jakarta

E-mail: l.savitri@bapeten.go.id

### Artikel Tinjauan

#### Menyerahkan

28 September 2021

#### Diterima

16 November 2021

#### Terbit

15 Desember 2021

### ABSTRAK

KAJIAN PEMANTAUAN DOSIS NEUTRON TERHADAP PEKERJA RADIASI PADA PENGOPERASIAN LINAC DENGAN ENERGI FOTON  $\geq 10$  MV. Penggunaan Linac untuk radioterapi mulai banyak menggunakan foton energi tinggi 10 MV, selain itu ada yang menggunakan 15 MV dalam terapi pasien untuk penggunaan rutin, juga masih ada penggunaan 6 MV. Tujuan kajian ini untuk memperoleh gambaran dan informasi dosis neutron yang berpotensi memberikan tambahan dosis bagi pekerja radiasi yang mengoperasikan pesawat Linac 10 MV. Berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013 Pasal 48 ayat (2) dinyatakan bahwa pada pengoperasian Linac dengan energi foton sinar-X di atas 10 MV, dinding perisai harus dilapisi dengan bahan penyerap neutron. Pernyataan tersebut sesuai dengan IAEA-TecDoc 1891 bahwa neutron akan berpotensi memberikan dampak radiologik yang signifikan pada pekerja, jika dioperasikan rutin pada energi di atas 10 MV, sehingga proteksi bagi pekerja harus diperhatikan. Hasil survei 27 rumah sakit, diperoleh data dan informasi melalui pengisian kuesioner dan diskusi serta divalidasi dengan B@LIS Pendora didapatkan tren dosis tahunan yang diterima setiap profesi pekerja pada pengoperasian Linac 6 MV, 10 MV dan 15 MV adalah kurang dari 1 mSv, hanya sebagian kecil dosis pekerja yang di atas 1 mSv (di atas persentil 90). Kajian ini dapat disimpulkan bahwa kehadiran neutron pada Linac sampai 10 MV dipandang belum signifikan memberikan dampak radiologik pada pekerja, dan direkomendasikan kriteria/ mekanisme pemantauan dosis neutron pekerja pada Linac sampai 10 MV, dapat didasarkan pada jika dari hasil kajian keselamatan diperoleh dosis yang diterima pekerja  $\leq 1,5$  mSv/tahun, maka tidak diperlukan pemantauan dosis neutron atau jika hasil pengukuran paparan radiasi neutron maupun gama di sekitar ruang Linac  $\leq 7,5$   $\mu$ Sv/jam, maka tidak perlu pemantauan neutron. Pada Linac di atas 10 MV, jika dosis efektif tahunan  $\leq 1,5$  mSv/tahun, maka tidak diperlukan pemantauan dosis personal khusus neutron, namun dapat dipertimbangkan pemantauan paparan radiasi rutin dua tahun sekali.

**Kata Kunci:** Dosis Neutron, Pekerja Radiasi, Linac, Pemantauan Dosis.

### ABSTRACT

*The use of Linac for radiotherapy is starting to use a lot of high-energy photons of 10 MV; in addition, some use 15 MV for patient therapy in routine use, there is also the use of 6 MV. The purpose of this study is to obtain an overview and information of the neutron dose that has the potential to provide additional doses for radiation workers operating the Linac 10 MV aircraft. Based on the Regulation of the Head of BAPETEN No. 3 of 2013, Article 48 paragraph (2) states that in the operation of Linac with X-ray photon energies above 10 MV, must coat the shield wall with a neutron-absorbing material. The statement follows the IAEA-TecDoc 1891 that neutrons will have the potential to have a significant radiological impact on workers if routinely operated at energies above 10 MV, so must consider protection for workers. The results of a survey from 27 hospitals, obtained information through filling out questionnaires and discussions and validated with B@LIS Pendora, it found that the trend of annual doses received by each profession in the operation of Linac 6 MV, 10 MV, and 15 MV was less than one mSv, only partially small worker dose that is above one mSv (above the 90th percentile). This study concluded that the presence of neutrons in Linacs up to 10 MV was deemed not to have a*

significant radiological impact on workers. The recommended criteria/mechanism for monitoring worker neutron doses in Linacs up to 10 MV could be based on if the safety study results obtained a dose received by workers 1.5 mSv/year. Then, there is no need to monitor the neutron dose. If the measurement results of exposure to neutron and gama radiation around the Linac space are 7.5 Sv/hour, there is no need for neutron monitoring. In Linacs above 10 MV, if the annual effective dose is 1.5 mSv/year, there is no need to monitor the dose of special neutron personnel. Still, routine radiation exposure monitoring may be considered every two years.

**Keywords:** Neutron Dose, Radiation Worker, Linac, Dose Monitoring.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang pesat pada modalitas radiasi pengion untuk radioterapi yang dapat memberikan dosis radiasi yang tepat pada sel kanker dan melindungi organ atau jaringan sehat daerah sekitar. Sesuai data perizinan BAPETEN per 19 Juli 2021 [1] tercatat ada 41 rumah sakit di Indonesia yang menggunakan modalitas teknologi radioterapi, seperti Akselerator Linier (Linac), Teleterapi Co-60, *Gama Knife*, Tomoterapi dan Brakhiterapi untuk mengobati pasien kanker, serta 15 rumah sakit yang saat ini sedang membangun fasilitas radioterapi. Dari data 41 rumah sakit tersebut, 33 rumah sakit diantaranya menggunakan Linac yang mulai beralih ke penggunaan Linac dengan foton energi tinggi 10 MV dan selain itu ada rumah sakit yang menggunakan energi 15 MV dalam melakukan terapi ke pasien untuk penggunaan rutin, di samping juga masih ada penggunaan dengan energi 6 MV.

Pada Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2013 Pasal 48 ayat (2) menyatakan bahwa pada pengoperasian Linac yang mempunyai energi foton sinar-X di atas 10 MV ( $> 10$  MV), dinding perisai harus dilapisi dengan bahan penyerap neutron [2]. Pernyataan tersebut sesuai dengan dokumen IAEA-Tecdoc 1891 bahwa neutron akan berpotensi memberikan dampak radiologik yang signifikan pada pekerja, jika dioperasikan rutin pada energi di atas 10 MV, sehingga proteksi bagi pekerja radiasi harus diperhatikan [3].

Dalam dokumen *National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) Report No. 151* juga disebutkan bahwa dinding beton sebagai dinding primer dapat berfungsi sebagai penyerap radiasi neutron, sedangkan yang berpotensi perlu pertimbangan desain karena kehadiran neutron adalah penahan sekunder, khususnya pada desain labirin (*maze*) dan penambahan bahan penyerap neutron pada pintu ruang Linac [4].

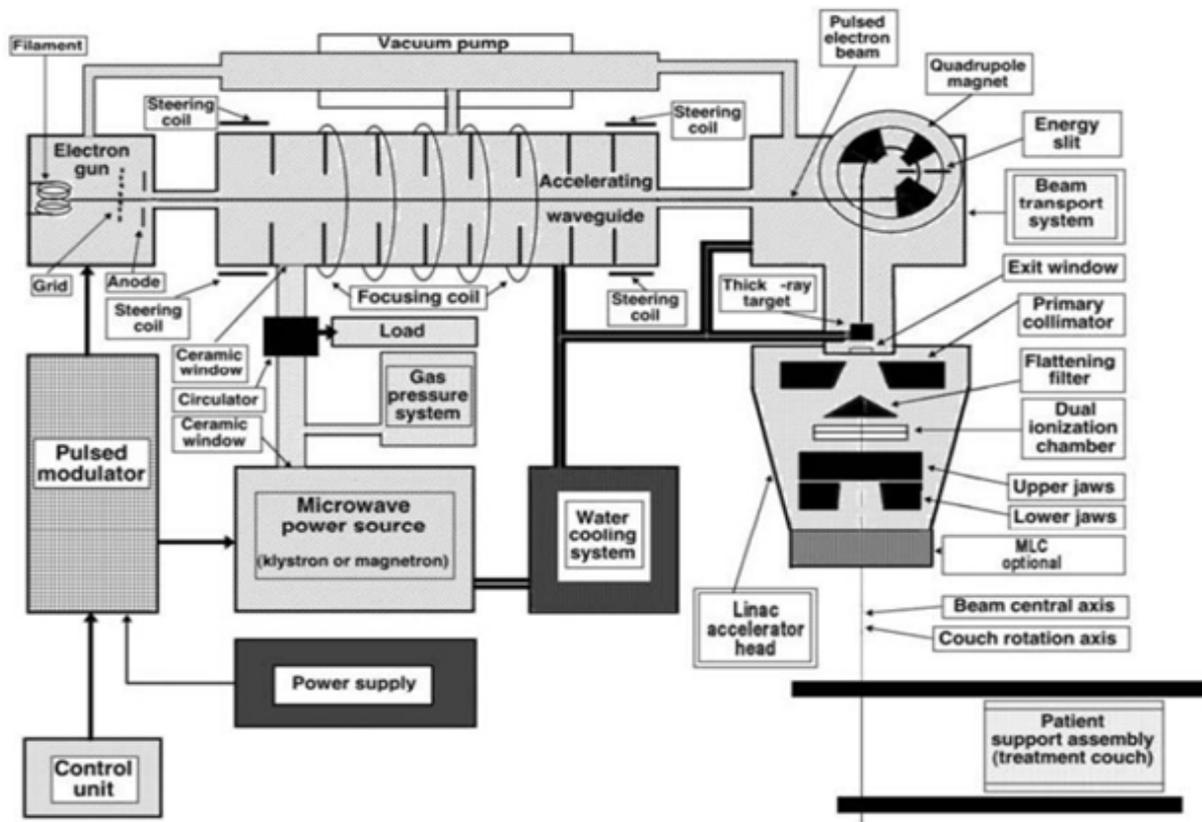
Berdasarkan beberapa hasil penelitian dan pengukuran neutron pada pengoperasian Linac

dengan energi tinggi 10 MV menunjukkan adanya paparan neutron dan ini dikhawatirkan berpotensi memberi kontribusi tambahan dosis radiasi yang diterima pekerja radiasi. Selain itu, rujukan internasional juga menyebutkan bahwa Linac yang dioperasikan pada energi 10 MV menghasilkan fotoneutron dan foton gama hasil tangkapan neutron [5], sehingga ketika mendesain ruang radioterapi Linac 10 MV perlu diperhitungkan aspek keselamatan radiasi karena kehadiran neutron. Salah satu aspek keselamatan radiasi adalah memastikan proteksi dan keselamatan radiasi terhadap pasien, pekerja radiasi dan masyarakat.

## 2. LANDASAN TEORI

Desain umum sistem Linac ditunjukkan pada Gambar 1. terbagi menjadi 2 (dua) bagian yaitu bagian pemercepat elektron dan bagian foton yang dihasilkan dari elektron yang menumbuk target. neutron dapat dihasilkan oleh Linac pada kedua bagian tersebut. Elektron yang dipercepat dengan energi tinggi (orde MeV) menumbuk target dapat memunculkan reaksi ( $e, e'n$ ) selain ( $e, \gamma$ ). Pada saat foton (orde MV) dihasilkan dari elektron yang menumbuk target kemudian terkena pada kolimator primer, filter perata (*flattening filter*), kolimator sekunder (*jaws*), kolimator multileaf (MLC), bahan head linac, maka dapat menghasilkan neutron dari reaksi ( $\gamma, n$ ). Selain pada bagian Linac, neutron juga dapat dihasilkan dari reaksi foton dengan bahan penahan radiasi di ruang radiasi [5, 10] dan hampir semua material yang berada di sekitar Linac memiliki potensi untuk menghasilkan neutron.

Foton berenergi tinggi memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan foton berenergi lebih rendah, seperti keluaran (*delivery*) dosis yang lebih baik untuk tumor ganas yang berakar dalam, dosis kulit ringan dan sensitivitas yang lebih rendah terhadap homogenitas jaringan, tetapi di sisi lain, untuk energi foton lebih dari 6 MV dan sebagian besar  $\geq 10$  MV, komponen yang membentuk kepala

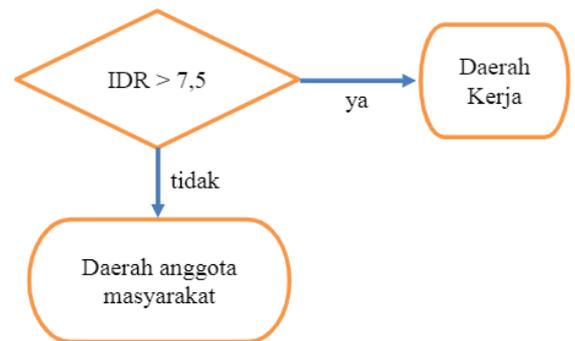


**Gambar 1:** Blok Diagram Linac [7]

Linac, ruang penyinaran (bunker) akan memberikan tambahan dosis pada pekerja radiasi dan pasien, karena interaksi fotoneutron, penangkapan neutron dan elektroneutron. Dengan menggunakan energi foton yang lebih tinggi, lebih besar jumlah monitor unit, ukuran lapangan yang lebih besar dan menambahkan aksesori penyinaran (maintenance accessories), laju dosis yang diinduksi menjadi lebih besar di isosenter terutama karena aktivasi bahan dengan nomor atom ( $Z$ ) tinggi di dalam kepala Linac [8].

Neutron yang dihasilkan dari proses fotoneutron dapat meningkatkan dosis yang tidak diinginkan untuk pasien dan pekerja radiasi yang segera memasuki ruangan setelah selesai penyinaran atau untuk persiapan penyinaran pasien berikutnya. Namun paparan radiasi yang diterima pekerja radiasi karena radioaktivitas yang diinduksi tergantung pada beberapa parameter, termasuk jenis Linac dan komponennya, laju dosis, energi foton, waktu masuk (jeda) setelah selesai penyinaran.

Berdasarkan hasil pengukuran verifikasi perizinan menunjukkan paparan radiasi neutron pada pengoperasian Linac dengan energi foton 10 MV di 8 (delapan) rumah sakit cukup signifikan pada



**Gambar 2:** Skema penentuan daerah kerja sesuai hasil IDR (nilai dalam  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ ) [9] jarak pengukuran 30 cm dari pintu, sehingga perlu pembatasan akses pekerja dan masyarakat di sekitar fasilitas dengan memberikan tanda yang mudah terlihat dan jelas terbaca.

Selain itu, dalam pedoman pengukuran paparan radiasi BAPETEN [9], batasan masuk daerah kerja untuk pekerja radiasi dan daerah anggota masyarakat adalah sebesar 7,5 mSv/jam. Batasan tersebut dinyatakan dalam hasil pengukuran paparan radiasi sesaat (*Instantaneous Dose Rate, IDR*). Skema penentuan batasan masuk daerah kerja yang membutuhkan pemantauan radiasi dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa batasan untuk masuk sebagai daerah kerja bagi pekerja radiasi berdasarkan hasil pengukuran dengan surveymeter adalah 7,5 mSv/jam. Artinya, jika hasil pengukuran di atas 7,5 mSv/jam maka daerah itu masuk sebagai daerah kerja. Sebagaimana diketahui daerah kerja bagi pekerja radiasi sesuai dengan Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2013 [2] meliputi daerah supervisi dan daerah pengendalian. Daerah supervisi ditetapkan apabila potensi terimaan paparan radiasi personel melebihi nilai batas dosis anggota masyarakat dan kurang dari 3/10 nilai batas dosis pekerja atau 6 mSv/tahun. Sedangkan daerah pengendalian ditetapkan apabila potensi terimaan dosis pekerja radiasi melebihi 6 mSv/tahun. Oleh karena itu, kriteria nilai paparan radiasi 7,5 mSv/jam dapat digunakan sebagai batasan kriteria diperlukan atau tidaknya pemantauan dosis personel (misalnya pekerja radiasi pakai TLD atau tidak).

### 3. METODE

Studi ini dilaksanakan dengan metode analisis diskriptif, dari data pustaka dan data survei yang diperoleh melalui kuesioner. Data survei diperoleh dengan menganalisis 940 (sembilan ratus empat puluh) data dosis pekerja radiasi di 27 (dua puluh tujuh) rumah sakit yang mengoperasikan pesawat Linac <sup>3</sup> 10 MV. Data dosis yang di analisis tersebut diperoleh dari tahun 2017 sampai dengan triwulan pertama tahun 2020. Data dosis yang didapat melalui kuesioner tersebut divalidasi dengan data B@LIS Pendoro, diskusi dengan pengguna, serta hasil verifikasi perizinan dan inspeksi yang dilakukan oleh Tim Inspeksi BAPETEN.

**Tabel 1:** Nilai Qn pada Linac 10 MV yang ada di Indonesia [4, 11]

No.	Linac Merk 10 MV	Model	Nilai Qn* (Neutron/Gy) (x 10 <sup>12</sup> )
1.	Elekta		0.06
2.	Siemens	Primus (with MiMIC)	0.02
3.	Siemens	MD2	0.08
4.	Varian	1800C	0.06
5.	Varian	18C	0.059
6.	Varian	2100C/2300C	3.8

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari kajian pustaka, secara umum, pada desain Linac sudah dapat diidentifikasi adanya neutron yang dihasilkan dari mesin Linac, maka pada tahapan desain modalitas Linac ada persyaratan radiasi bocor untuk neutron. Batasan radiasi bocor karena kehadiran neutron tidak boleh melebihi 0,2% dari besarnya dosis pada isosenter. Radiasi bocor karena foton tidak boleh lebih dari 0,1% dari besarnya dosis pada isosenter [10].

Data pada Tabel 1, menunjukkan bahwa pada energi Linac 10 MV menghasilkan fotoneutron. Hasil pengukuran lain menyatakan bahwa pada energi nominal 10 MV memiliki tegangan percepatan efektif sebesar 11,6 MV, sehingga sangat penting untuk memastikan bahwa berkas foton 10 MV pada kenyataannya tidak lebih dekat ke berkas 12 MV karena konfigurasi Linac [4, 11, 12].

Pada desain modalitas Linac yang sudah menunjukkan adanya potensi induksi neutron maka penting diperhatikan adalah saat merancang dan membuat desain ruang Linac. Dalam dokumen *NCRP Report No. 151* [4] disebutkan bahwa dinding beton (baik beton biasa ataupun beton berat) sebagai penahan primer, maka penahan tersebut memadai untuk menyerap seluruh fotoneutron dan foton gama hasil tangkapan neutron, sehingga tidak diperlukan tambahan penahan. Hal ini disebabkan kandungan hidrogen relatif tinggi pada beton sehingga menghasilkan tampang lintang serapan neutron tinggi. Sedangkan yang berpotensi perlu pertimbangan desain karena kehadiran neutron adalah penahan sekunder, khususnya pada desain labirin (*maze*) dan penambahan bahan penyerap neutron pada pintu ruang Linac.

Pemilihan penahan primer yang terdiri dari beton secara keseluruhan berbeda dengan yang berlapis antara beton dan logam harus mempertimbangkan atenuasi dan produksi fotoneutron dan foton gama hasil tangkapan neutron jika menggunakan Linac dengan energi di atas 10 MV. Pada kasus energi tinggi jika desain dengan sistem komposit tidak dilakukan dengan benar, maka lapisan logam dapat menjadi sumber fotoneutron yang berpotensi menghasilkan kenaikan paparan di sisi luar penahan radiasi. Perlu diperhatikan bahwa permasalahan ini hanya

untuk penahan primer dan tidak untuk penahan sekunder [4, 13].

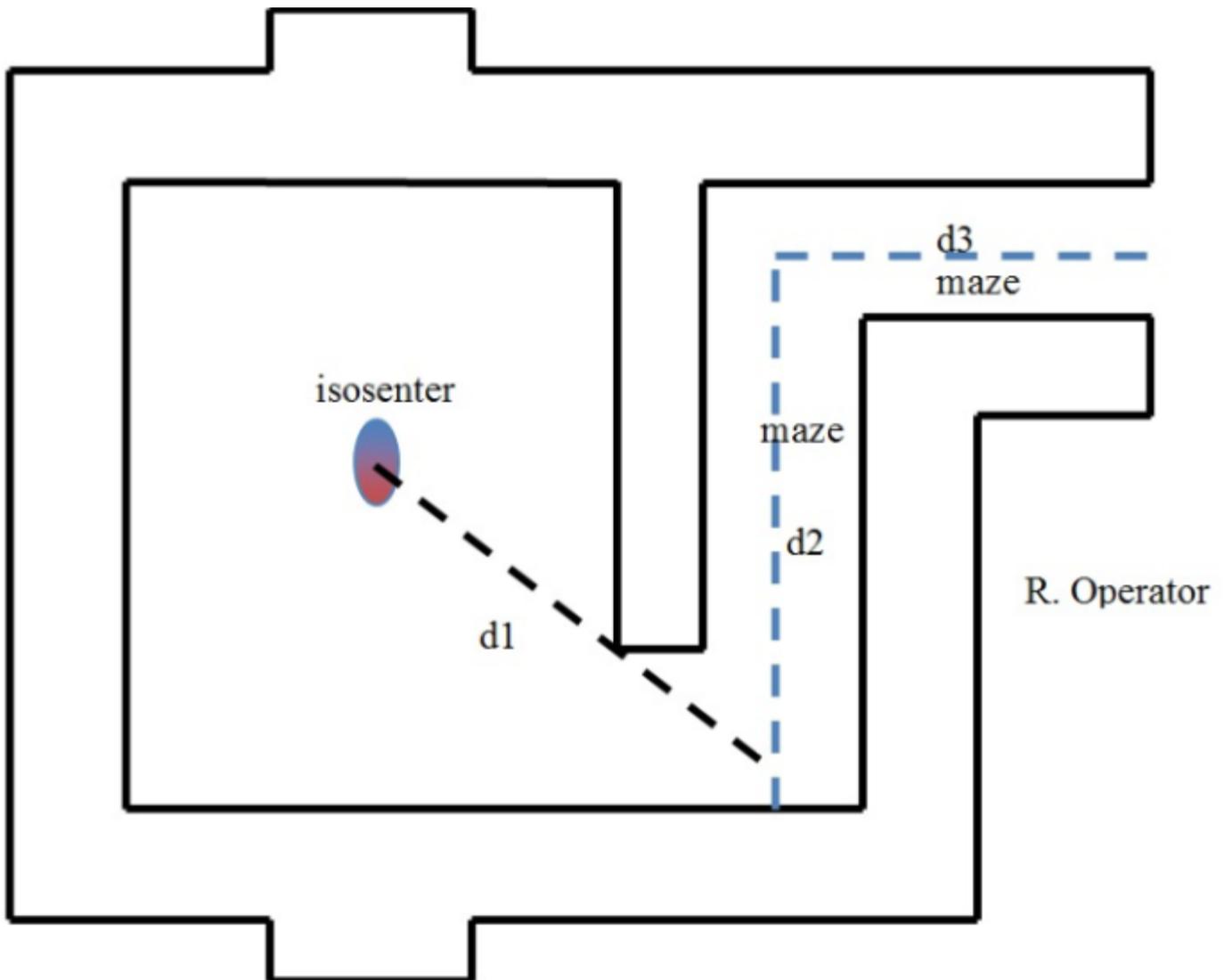
Secara desain, modalitas Linac yang dioperasikan pada energi 8 MV sudah menghasilkan fotoneutron. Sehingga dapat diperkirakan bahwa Linac yang dioperasikan pada energi 10 MV juga menghasilkan fotoneutron. Sesuai dengan hasil kalkulasi besarnya fotoneutron dan foton gama hasil tangkapan neutron pada Linac yang dioperasikan 10 MV menunjukkan bahwa fotoneutron dan foton gama hasil tangkapan neutron berpengaruh pada desain labirin dan pintu [4].

Linac yang digunakan rutin pada energi 10 MV perlu mempertimbangkan desain labirin (*maze*) yang lebih panjang dan berliku (labirin lebih dari 1 belokan) serta penambahan bahan penyerap neutron pada pintu ruang Linac (jika perlu). Linac medis yang beroperasi kontinyu pada  $> 10$  MV memerlukan pintu yang dapat menahan radiasi dari neutron dan

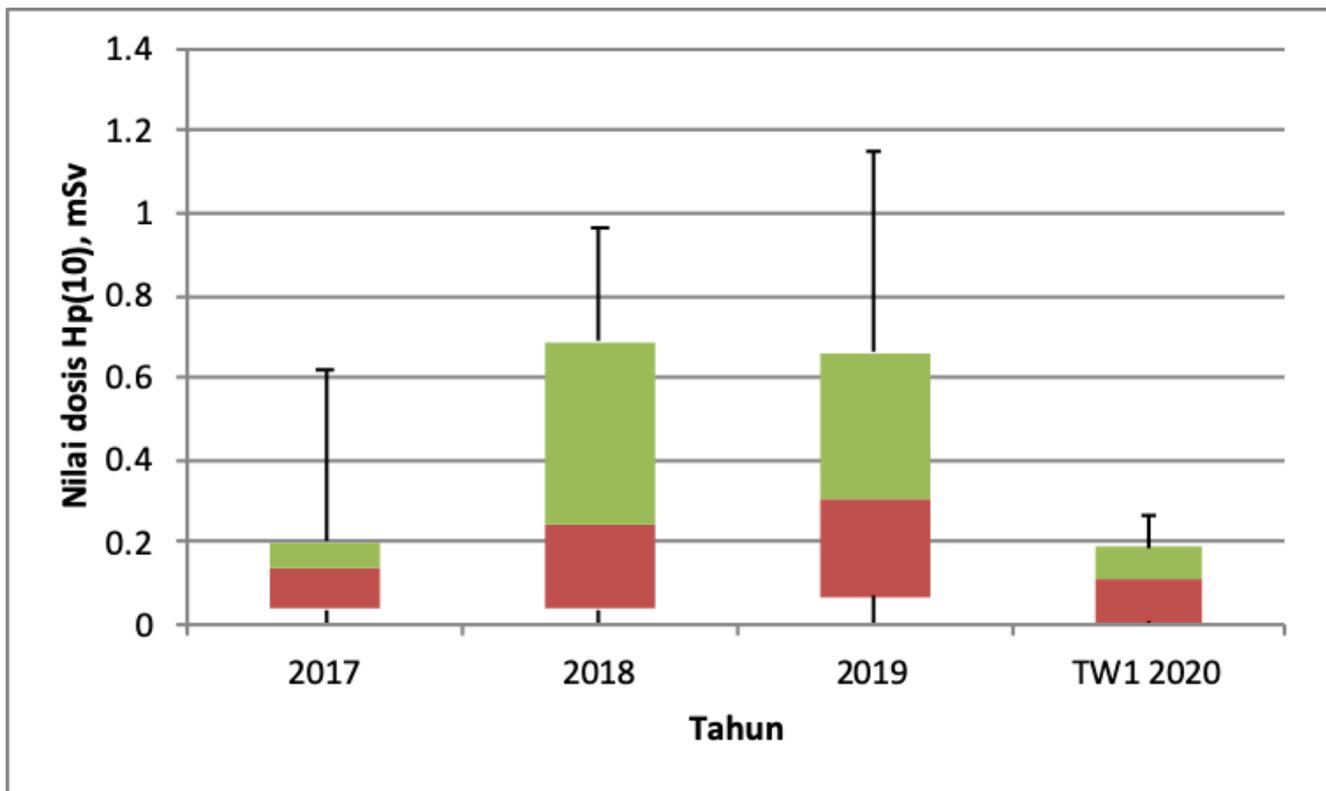
foton. Dosis ekivalen neutron di pintu masuk yang memiliki labirin memiliki variasi perubahan sedikit, dan sebagian besar tidak terpengaruh oleh pengaturan kolimator. Fluens neutron maksimum diperoleh pada saat kolimator ditutup, hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar fotoneutron berasal dari kepala Linac. Medan neutron dalam labirin juga merupakan fungsi dari bidang rotasi sudut gantri dan lokasi target saat penyinaran [4, 13].

Dari Gambar 3, dapat dilihat bahwa desain ruang Linac untuk mereduksi neutron pada pintu harus mempertimbangkan [11]:

- panjang jarak dari isosenter ke garis tengah labirin minimal 7 meter;
- panjang *maze*/labirin minimal 7 meter;
- labirin/*maze* dibuat bend/berkelok sehingga panjang total minimal 12 meter; dan
- lebar labirin/*maze* tidak boleh lebih dari 2 meter.



**Gambar 3:** Disain ruang Linac untuk simulasi reduksi neutron pada pintu [11]



**Gambar 4:** Rekapitulasi dosis pekerja radiasi di fasilitas Linac [15]

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat bahwa mayoritas dosis yang diterima pekerja radiasi di fasilitas Linac adalah kurang dari 1 mSv per tahun. Pada Gambar 4 tersebut, nilai maksimum diset pada nilai persentil 90, dan menunjukkan bahwa nilai dosis pada tahun 2017, 2018, dan triwulan 1 2020 berada di bawah nilai 1 mSv per tahun. Data dosis pada tahun 2019 yang menunjukkan nilai persentil 90 lebih dari 1 mSv per tahun, yaitu sebesar 1,15 mSv per tahun. Ini menunjukkan bahwa data dosis yang diterima oleh pekerja radiasi pada fasilitas Linac sangat kecil per tahunnya, yaitu di bawah 1 mSv/tahun. Alasan dipilihnya persentil 90 karena dapat menunjukkan bahwa hanya sekitar 10% dosis yang diterima oleh pekerja radiasi dari periode tahun 2017 sampai dengan triwulan 1 tahun 2020 yang melebihi 1,15 mSv per tahun. Nilai dosis di atas persentil 90 yang termasuk kategori outlier tidak termasuk obyek yang dibahas dalam makalah ini, karena makalah ini tidak berfokus pada nilai *outlier*.

Dari Tabel 2 diperoleh data tren dosis tahunan yang diterima pekerja pada rumah sakit yang menggunakan Linac 10 MV memperlihatkan hanya ada 6 rumah sakit yang memperoleh dosis akumulatif di atas 1,5 mSv/tahun pada nilai persentil 95. Dosis-dosis tersebut yang sifatnya outlier dan tidak menjadi

fokus dalam pembahasan tulisan ini. Fokus tulisan ini menunjukkan bahwa mayoritas dosis, yaitu di bawah persentil 95 menunjukkan nilai dibawah 1 mSv. Hal ini menunjukkan bahwa secara radiologik dampak dosis di bawah 1 mSv per tahun itu dapat diabaikan, merujuk pada batasan dosis untuk masyarakat umum atau publik 1 mSv per tahun. Sesuai dengan Peraturan Kepala (Perka) BAPETEN No. 3 Tahun 2013 [2], yang termasuk pekerja radiasi adalah setiap orang yang bekerja di instalasi nuklir atau instalasi radiasi pengion yang diperkirakan menerima dosis tahunan melebihi dosis untuk masyarakat umum. Artinya, pemantauan dosis pekerja radiasi menjadi keharusan jika potensi terimaan dosis radiasinya melebihi 1 mSv per tahun. Batasan 1 mSv per tahun ini dipertegas lagi dengan pada Pasal 27 dan 28 Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2013 [2] bahwa pekerja radiasi yang berpotensi menerima paparan radiasi melebihi 3/10 nilai batas dosis pekerja atau 6 mSv per tahun harus melaksanakan tindakan proteksi dan keselamatan radiasi dengan menyediakan peralatan pemantauan radiasi bagi pekerja radiasi. Sesuai peraturan tersebut, apabila nilai 6 mSv/tahun tidak terlampaui maka pemantauan dosis perorangan (misal pemakaian TLD gama atau neutron) tidak diperlukan.

**Tabel 2:** Data dosis pekerja radiasi (persentil 95) di 27 RS yang memiliki izin pemanfaatan pesawat linac 10 MV dan 15 MV

No	Fasilitas Kesehatan	Persentil 95			
		2017	2018	2019	2020 (TWI)
1	RS A	0,19	0,31	1,06	0,37
2	RS B	0,68	0,39	0,28	0,52
3	RS C	3,01	1,25	2,14	0,31
4	RS D	0,23	0,02	0,05	0,02
5	RS E		0,01	0,17	0,25
6	RS F	0,96	4,25	1,96	0
7	RS G	0,60	1,77	2,63	0,63
8	RS H	0,30	0,00	0,54	0,00
9	RS I	0,00	0,00	0,38	0,40
10	RS J		0,63	1,24	0,48
11	RS K	0,12	0,17	0,06	0,28
12	RS L	0,00	0,19	0,53	0,06
13	RS M	0,14	0,21	0,13	0,20
14	RS N	1,14	0,78	19,62	0,55
15	RS O	0,43	0,17	0,12	0,19
16	RS P	0,18	1,57	0,72	0,35
17	RS Q	0,66	0,35	0,16	0,23
18	RS R	0,25	0,46	0,50	0,11
19	RS S	0,42	0,25	0,87	0,15
20	RS T	0,37	0,08	0,41	0,11
21	RS U	0,40	0,21	1,01	0,14
22	RS V	0,07	0,56	0,32	0,19
23	RS W	0,58	1,10	0,55	-
24	RS X	0,04	0,26	2,20	0,15
25	RS Y	1,04	0,72	1,25	-
26	RS Z	0,18	1,00	0,79	0,20
27	RS AA	0,79	0,63	0,82	0,09

Sebaran data dosis pada Gambar 4 menunjukkan nilai dosis gama yang diterima oleh pekerja radiasi pada fasilitas Linac. Dosis tersebut belum mempertimbangkan kehadiran neutron dan kontribusinya pada dosis yang diterima oleh pekerja radiasi. Jika kontribusi dosis neutron yang diterima oleh pekerja radiasi sekitar 20% lebih besar dari dosis gama [16], maka perolehan dosis pekerja radiasi diperkirakan sekitar 1,38 mSv (dihitung dari nilai 1,15 mSv + 20% x 1,15 mSv). Nilai 1,38 mSv jika dikonservatifkan dapat menjadi 1,5 mSv per tahun, sehingga dosis efektif tahunan yang diterima oleh pekerja radiasi dengan memasukkan kontribusi dosis gama dan neutron tidak lebih dari 1,5 mSv per tahun. Berdasarkan data tersebut, maka pemantauan dosis pekerja radiasi menggunakan dosimeter

neutron dipandang kurang efektif jika dosis tahunan pekerja radiasi kurang dari 1,5 mSv. Meskipun demikian perlu dilakukan pemantauan paparan radiasi disekitar ruang Linac secara rutin, misalnya dua tahun sekali mencakup paparan radiasi gama dan neutron. Pemantauan paparan radiasi neutron dapat digunakan untuk memverifikasi data dosis tahunan pekerja radiasi dalam hal komposisi radiasi gama dan neutron yang terdeteksi dengan nilai dosis tahunan pekerja radiasi.

Kriteria pemantauan paparan radiasi neutron sebesar 1,5 mSv/tahun akan ditambahkan dengan parameter rasio antara radiasi gama dan neutron jika infrastruktur pemantauan radiasi dengan dosis neutron sudah tersedia (laboratorium pengujian, dosimetri dan kalibrasi). Artinya, jika rasio antara radiasi neutron > 20% dibanding dengan radiasi gama, maka dibutuhkan pemantauan neutron bagi pekerja radiasi melalui pemantauan dosis personel. Kriteria pemantauan radiasi neutron yang dipilih ini (1,5 mSv/tahun) lebih konservatif dibanding dengan US-NRC yang merekomendasikan nilai dosis efektif yang diterima pekerja radiasi mencapai 0,3 mSv/tiga bulan, dengan akumulasi 1,2 mSv/tahun diperlukan dilakukan pemantauan dosis neutron bagi pekerja radiasi [13].

Justifikasi pemilihan kriteria pemantauan dosis neutron sebesar 1,5 mSv/tahun tidak memperhatikan hasil pengukuran langsung neutron di fasilitas karena infrastruktur pemantauan radiasi neutron belum tersedia seperti laboratorium kalibrasi dan dosimetri neutron belum siap dan masih dalam tahapan pengembangan. Kriteria kontribusi dosis neutron dari pengukuran (pengukuran aktif maupun pasif) hanya berdasarkan perkiraan konservatif, yaitu 20% kontribusinya selain dosis gama. Artinya, jika nanti sudah tersedia infrastruktur pengukuran neutron (baik dari alat ukur, pedoman, dan ketersediaan laboratorium) maka dapat divalidasi seberapa besar kontribusi kehadiran neutron di Linac yang memberi tambahan dosis ke pekerja, di atas atau di bawah 20%. Jika kontribusinya di atas 20% maka diwajibkan pemegang izin untuk memberikan jaminan keselamatan personel yang bekerja di Linac dipantau dosis neutronnya dengan penyediaan personel dosimeter khusus neutron di samping pemantauan dosis gama.

## 5. SIMPULAN

Pada desain Linac sampai 10 MV, sudah diidentifikasi hadir neutron pada isosenter, sehingga pabrikan memberikan nilai kuat neutron ( $Q_n$ ) yang dapat digunakan dalam tahap mendesain ruang Linac. Kehadiran neutron dapat diminimalkan dengan memberi perhatian pada saat membuat desain ruangan Linac, khususnya luas ruangan penyinaran, dan desain labirin/maze. Sehingga kehadiran neutron pada Linac 10 MV dipandang tidak signifikan memberikan tambahan dosis ke pekerja radiasi.

Hal ini ditunjang dengan tren dosis tahunan yang diterima setiap profesi pekerja pada pengoperasian Linac 10 MV tidak melebihi 1 mSv, hanya ada sebagian kecil dosis pekerja yang melebihi 1 mSv (di atas persentil 90).

Kebutuhan pemantauan neutron yang dapat direkomendasikan untuk penggunaan di Linac sampai 10 MV dapat didasarkan pada hasil kajian keselamatan (*safety assessment*), jika:

- dosis yang diterima pekerja radiasi  $\leq 1,5$  mSv/tahun, maka tidak diperlukan pemantauan dosis neutron untuk personel (misal, tidak perlu TLD neutron); atau
- hasil pengukuran paparan radiasi neutron maupun gama di sekitar ruang Linac  $\leq 7,5$   $\mu$ Sv/jam, maka tidak perlu pemantauan neutron.

Selanjutnya, pada Linac di atas 10 MV, jika dosis efektif tahunan pekerja radiasi tidak lebih dari 1,5 mSv/tahun, maka tidak diperlukan pemantauan dosis personel khusus untuk neutron, namun dapat dipertimbangkan pemantauan yang sederhana seperti pemantauan paparan radiasi rutin 2 tahun sekali.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pengawas tenaga Nuklir, Aplikasi Balis Perizinan, diakses tanggal 19 Juli 2021.
- [2] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, “Peraturan Kepala (Perka) BAPETEN No. 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Radioterapi”, Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2013 Nomor 671, Jakarta 2013.
- [3] International Atomic Energy Agency, “Regulatory Control of the Safety of Ion Radiotherapy Facilities”, IAEA-TECDOC-1891, Vienna 2020.
- [4] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), “Structural Shielding Design and Evaluation For Megavoltage X- and Gama-Ray Radiotherapy Facilities”, NCRP Report No. 151, 2005.
- [5] Vega-Carrillo, H.R., dkk., “Photon and Photoneutron Spectra Produced in Radiotherapy Linacs”, XII International Symposium/XXII National Congress on Solid State Dosimetry, Mexico City, September 5th to 9th, 2011.
- [6] S Yani et al., “Neutron contamination of Varian Clinac iX 10 MV photon beam using Monte Carlo simulation”, 13th South-East Asian Congress of Medical Physics 2015 (SEACOMP), IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 694, 2016
- [7] Tuathan O’Shea, Monte Carlo Simulation of Medical Accelerator Electron Treatment Heads, School of Physics, National University of Ireland Galway, Ireland, 2011.
- [8] Bahareh Nourmohammadi and Asghar Mesbahi, “A Review On The Radiation Therapy Technologist Received Dose From Induced Activation In High-Energy Medical Linear Accelerators”, Radiation Protection Dosimetry (2018), Vol. 179, No. 4, pp. 333–348, doi:10.1093/rpd/ncx292, Advance Access publication 22 December 2017.
- [9] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, “Pedoman Teknis Pengukuran Paparan Radiasi di Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif (Implementasi Pembatas Dosis Dalam Tahap Disain Dan Daerah Kerja Radiasi)”, Jakarta, 2017.
- [10] Varian, “Specification CLinac iX Accelerator”, Varian Medical Systems, 2014.
- [11] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, “Kajian Proteksi Radiasi yang Terukur di Fasilitas Radioterapi”, Jakarta, 2016.

- [12] Isra Israngkul-Na-Ayuthaya et al, "Evaluation of equivalent dose from neutrons and activation products from a 15 MV X-ray Linac", journal of Radiation Research, Vol.56, No.6,2015, pp 919-926]
- [13] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "Pedoman Teknis Perhitungan dan Evaluasi Desain Ruang Radiasi pada Fasilitas Radioterapi", Jakarta, 2014.
- [14] Hosein Ghiasi & Asghar Mesbahi, "A new analytical formula for neutron capture gama dose calculations in double-bend mazes in radiation therapy", reports of practical oncology and radiotherapy 17, 220–225, 2012.
- [15] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Laporan Hasil Kajian (LHK) "Pemantauan Dosis Neutron Terhadap Pekerja Radiasi pada Pengoperasian Linac dengan Energi Foton  $\geq 10$  MV". Jakarta, 2020
- [16] US Nuclear Regulatory Commission, "Regulatory Guide Office of Standards Development", Regulatory Guide 8.14, Personnel Neutron Dosimeters, August 1977.