

ANALISIS KARAKTERISTIK *PERCENTAGE DEPTH DOSE (PDD)* DAN *PROFILE DOSE* PESAWAT *LINEAR ACCELERATOR (LINAC)* UNTUK BERKAS SINAR-X DENGAN VARIASI LUAS LAPANGAN PENYINARAN

Jusmawang, Syamsir Dewang, Bidayatul Armynah

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin

ANALYZES THE CHARACTERISTICS OF PERCENTAGE DEPTH DOSE (PDD) AND THE PROFILE DOSE DEVICE LINEAR ACCELERATOR (LINAC) FOR THE X-RAY BEAM WITH VARIATION AREA OF IRRADIATION FIELD

Jusmawang, Syamsir Dewang, Bidayatul Armynah

Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Hasanuddin University

Abstrak

Telah dilakukan penelitian tentang analisis karakteristik *Percentage Depth Dose (PDD)* dan *Profile Dose* berkas Sinar-X pesawat LINAC. Ukuran lapangan yang digunakan berkisar dari $2 \times 2 \text{ cm}^2$ sampai $40 \times 40 \text{ cm}^2$ dengan SSD 100 cm. Dari hasil pengukuran PDD diperoleh kedalaman maksimum (efektif) yang selanjutnya digunakan untuk mengukur profil dosis berkas. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kondisi pesawat LINAC selama digunakan dengan membandingkan data hasil pengukuran dan data acuan. Selain itu untuk melihat kondisi mana yang dianjurkan (dapat digunakan) dalam terapi radiasi. Hasil analisis PDD menunjukkan dosis efektif diterima pada kedalaman yang berkisar antara 13,8 cm sampai 15,8 cm untuk berkas Sinar-X 6 MV dan untuk berkas 10 MV berkisar pada kedalaman 21,8 cm sampai 23,8 cm, dengan deviasi pengukuran yang tergolong kecil yaitu 0% sampai 0,3%. Hasil analisis profil dosis (kerataan dan simetri) diperoleh deviasi kerataan kedua berkas hasil pengukuran dan data acuan yang berkisar antara 0% sampai 2,20% dan untuk simetri berkas berkisar antara 0% sampai 4,58% dimana nilai ini masih dalam rentang toleransi pengukuran yaitu $< 5\%$.

Kata Kunci : Linac, PDD, profil dosis, kerataan, simetri, Sinar-X 6 dan 10 MV

Abstract

A research to analyze the characteristic of Percentage Depth Dose (PDD) and Profile Dose X-Ray beam plane LINAC has been performed. Field sizes used range from $2 \times 2 \text{ cm}^2$ to $40 \times 40 \text{ cm}^2$ with a SSD of 100 cm. The measurement results was obtained maximum depth PDD (effective) which is used by measure the beam Profile Dose. This analyze aims to determine the best conditions, for a LINAC to compare measurement and reference data. In addition to saw which the recommended conditions (can be used) in radiation therapy. PDD analyze results indicate the effective dose received at a depth ranging from 13,8 to 15,8 cm for the X-Ray beam to beam 6 and 10 MV ranges at a depth of 21,8 to 23,8 cm, with a deviation measurements classified small ie 0 to 0,3%. Results of the analyze of the profile dose (flatness and symmetry) obtained by the difference in the two beam flatness measurement results and reference data ranged from 0 to 2,20% and for symmetry beam ranged from 0 to 4,58%, where the value is still within the tolerance range of measurement is $< 5\%$.

Keywords: LINAC, PDD, Profile Dose, Flatness, Symmetry, X-Rays 6 and 10 MV

PENDAHULUAN

Radiasi di bidang kedokteran membawa manfaat yang cukup nyata bagi yang menggunakannya. Dalam bidang radiodiagnostik suatu penyakit atau kelainan organ tubuh dapat lebih awal dan lebih teliti dideteksi. Salah satu kelainan organ tubuh yang dapat dilihat dan diketahui adalah tumor/kanker. Berbeda dengan

radiodiagnostik, radioterapi atau yang kita kenal dengan istilah terapi radiasi digunakan untuk terapi pengobatan yang bertujuan memperpanjang usia penderita kanker atau tumor.^[1]

Dibalik manfaat tersebut ada masalah yang sulit dihadapi yaitu tidak terisolasinya jaringan kanker yang akan diterapi, sehingga memungkinkan jaringan sehat ikut terkena

radiasi. Olehnya itu, pemberian dosis radiasi diharapkan agar dapat seoptimal mungkin hanya pada jaringan kanker, dan kalaupun mengenai jaringan sehat yang ada disekitar target radiasi diharapkan memberikan efek atau kerusakan yang tidak berarti.

Perawatan dan kalibrasi berkala menjadi suatu jaminan keselamatan baik bagi personil maupun masyarakat umum khususnya pasien. Sesuai dengan Perka BAPETEN Nomor 1 Tahun 2006 tentang Laboratorium Dosimetri, Kalibrasi Alat Ukur Radiasi dan Keluaran Sumber Radiasi Terapi, dan Standardisasi Radionuklida Bab V Pasal 12 Ayat 1 “Keluaran sumber radiasi teleterapi Gamma dan *Linier Accelerator* yang selanjutnya disebut LINAC wajib dikalibrasi untuk menjamin kebenaran nilai dosis serap.” Oleh karena demi mencapai standar yang ada, LINAC dirawat dan dikalibrasi secara berkala agar keluaran LINAC mampu memberikan dosis yang tepat pada target.^[2]

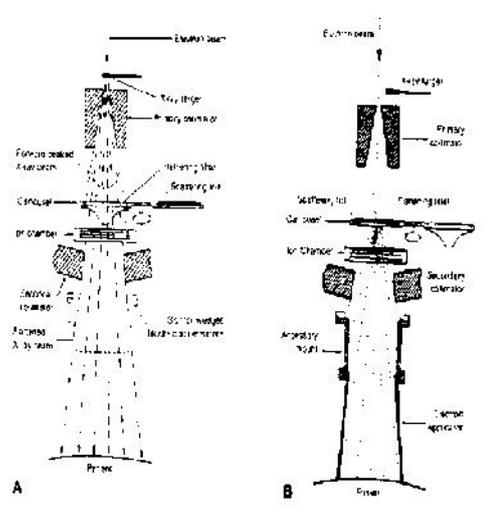
Salah satu parameter dari berkas radiasi yang diukur dalam kegiatan komisioning dan perawatan adalah kurva persentase dosis kedalaman (PDD) berkas radiasi baik Sinar-X maupun elektron pada suatu kondisi pengukuran.^[3] Pengukuran berkas Sinar-X yang keluar dari pesawat LINAC lebih akurat dapat diketahui dengan memperhatikan data, grafik dan profil persentase kedalaman dosis, dimana nilai persentase dosis pada suatu kedalaman tertentu dibandingkan dengan dosis pada kedalaman maksimum yang dinamakan *Percentage Depth Dose* (PDD). Sedangkan profil dosis adalah kurva yang menunjukkan bentuk muka sinar pada sumbu horizontal yang tegak lurus dari arah datangnya sinar. Kurva profil menunjukkan intensitas pada suatu bidang radiasi.^[4] Oleh karena itu, maka kami melakukan penelitian tentang “Analisis Karakteristik *Percentage Depth Dose* (PDD) dan *Profile Dose* Pesawat LINAC untuk Berkas Sinar-X 6 MV dengan Variasi Luas Lapangan” sebagai salah satu bentuk kendali kualitas terhadap LINAC.

TINJAUAN PUSTAKA

Pesawat Pemercepat Elektron

Linear Accelerator (LINAC) merupakan sebuah perangkat/alat yang menggunakan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi untuk mempercepat partikel bermuatan seperti elektron berenergi tinggi melalui tabung linear. Berkas elektron energi tinggi itu sendiri dapat digunakan untuk mengobati tumor dangkal, atau dapat dimodifikasi dengan dibenturkan ke target agar menghasilkan Sinar-X sehingga dapat digunakan untuk mengobati tumor yang berada jauh dari permukaan tubuh.^[5]

Hasil pembangkitan Sinar-X memiliki intensitas yang tinggi pada arah sumbu target. Sinar-X yang dihasilkan dilewatkan pada penyaring (*Flattening Filter*) dengan tujuan agar profil Sinar-X rata.^[5] Dengan adanya *Flattening Filter*, dosis relatif pada daerah sekitar sumbu utama menjadi lebih rendah dibanding daerah pinggir profil berkas Sinar-X.^[8]

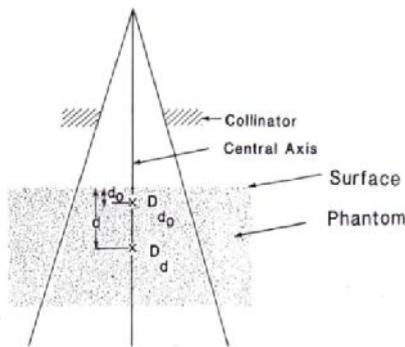


Gambar 1. A. Berkas Sinar-X, B. Berkas elektron.^[5]

Berkas Sinar-X kemudian disejajarkan oleh kolimator primer yang dapat bergerak yang juga terletak di kepala LINAC. Sinar selanjutnya dapat dibentuk oleh kolimator sekunder yang tetap melekat pada kepala unit pesawat.^[6]

Persentase Dosis Kedalaman (PDD)

Nilai Persentase dosis kedalaman dapat didefinisikan sebagai hasil bagi berupa persentase dosis yang terserap di kedalaman tertentu d terhadap kedalaman dosis acuan d_0 , sepanjang sumbu berkas (Gambar 2).^[5] PDD bergantung pada 4 parameter; kedalaman di dalam *Phantom*, luas lapangan penyinaran, jarak antara sumber dan permukaan (SSD) dan energi berkas foton.^[9]



Gambar 2. Persentase dosis kedalaman pada kedalaman tertentu (d) dan kedalaman acuan (d_0) dengan dosis maksimum.^[5]

$$PDD = \frac{D_d}{D_{d_0}} \times 100\% \quad (1)$$

D_d = Dosis serap pada titik d

D_{d_0} = Dosis serap pada titik maksimum

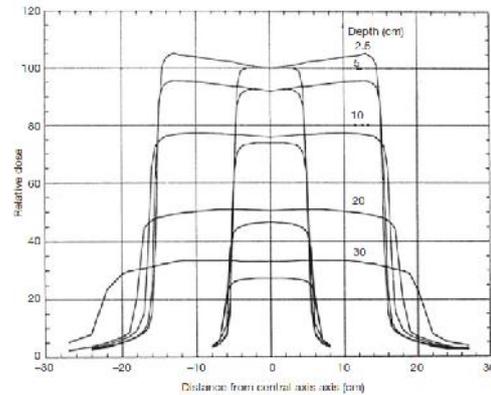
Untuk energi lebih tinggi, kedalaman acuan diambil pada posisi dosis terserap maksimum ($d_0 = d_m$).^[5]

Tabel 1. PDD untuk variasi berkas Sinar-X pada *Water Phantom* dengan luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$, SSD 100 cm, dan dua kedalaman (5 dan 10 cm).^[7]

	Berkas Sinar-X					
	Co-60	4 MV	6 MV	10 MV	18 MV	25 MV
Nilai D_{dm}	0,5	1	1,5	2,5	3,5	5
PDD (5,10,100)	80	84	86	92	97	98
PDD (10,10,100)	59	65	67	74	80	82

Profil Dosis (Profile Dose)

Profil berkas Sinar-X Megavolt terdiri dari tiga daerah, yaitu daerah pusat (*Central Region*, C), umbra (U) dan penumbra (P).



Gambar 3. Profil berkas Sinar-X untuk dua ukuran lapangan ($10 \times 10 \text{ cm}^2$ dan $30 \times 30 \text{ cm}^2$) yang berbeda dan variasi kedalaman.^[7]

Kerataan Berkas (Beam Flatness)

Keseragaman berkas (kerataan dan simetri) secara umum didefinisikan sebagai variasi dosis pada daerah 80% dari ukuran lapangan penyinaran pada kedalaman 10 cm pada bidang yang tegak lurus terhadap sumbu pusat. Keseragaman dosis yang didefinisikan dengan cara ini diharapkan berada dalam toleransi $\pm 3\%$.^[10] Namun dalam bukunya Khan mengungkapkan bahwa penggunaan radiasi pada kanker/tumor nilai batas toleransi maksimum untuk penggunaan radiasi adalah 5%.^[5] *Beam Flatness* (F) didefinisikan dengan menentukan terlebih dahulu nilai D_{max} dan D_{min} yang terletak pada daerah sentral 80% lebar berkas^[5,7].

$$F = 100 \times \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (2)$$

Spesifikasi kerataan untuk LINAC umumnya diukur dalam medium air pada kedalaman 10 cm, SSD 100 cm, lapangan maksimum yang tersedia (biasanya $40 \times 40 \text{ cm}^2$), selanjutnya diisyaratkan $F < 3\%$. Penentuan kerataan pada kedalaman 10 cm disebabkan pada D_{dm} adanya efek *Over-Flattening*, sedangkan yang terjadi pada profil dengan kedalaman lebih dari 10 cm yaitu *Under-Flattening*. Umumnya, nilai F pada D_{dm}

dengan lapangan $40 \times 40 \text{ cm}^2$ dan SSD 100 cm tidak boleh melebihi 5%.^[7]

Simetri Berkas (*Beam Symmetry*)

Nilai Simetri merupakan persentasi deviasi untuk dua titik yang berjarak sama dari pusat berkas. Alternatif lain, S ditentukan dengan menentukan terlebih dahulu luas profil berkas pada setiap sisi (kanan dan kiri) terhadap sumbu utama sampai pada 50% (terhadap 100% pada titik di sumbu utama).^[7]

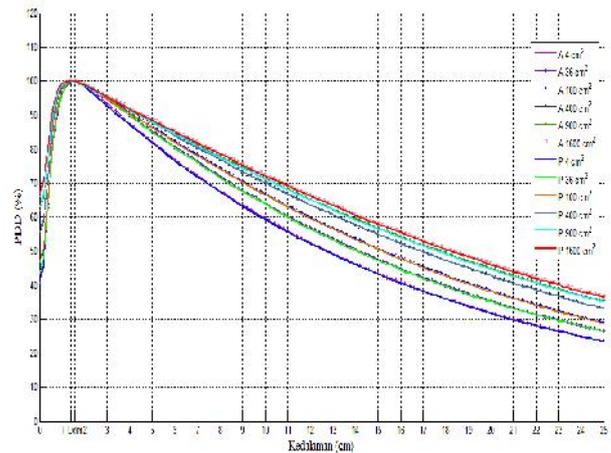
$$S = 100 \times \frac{\text{Daerah}_{\text{kiri}} - \text{Daerah}_{\text{kanan}}}{\text{Daerah}_{\text{kiri}} + \text{Daerah}_{\text{kanan}}} \quad (3)$$

METODOLOGI

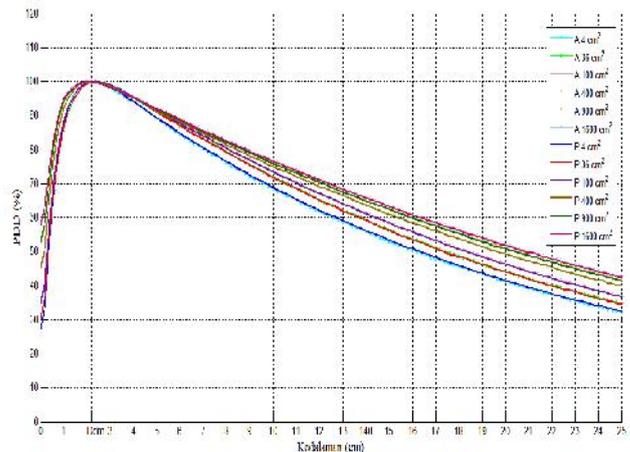
Analisi data berupa grafik PDD dan *Profile Dose* pada penelitian ini diawali dengan pengambilan data berupa grafik PDD dengan melakukan ekspose (penyinaran) pada luas lapangan tertentu untuk memperoleh kedalaman D_{dm} kemudian setelah itu dilakukan penyinaran pada kedalaman D_{dm} untuk memperoleh grafik *Profile Dose*. Dari grafik *Profile Dose* dapat dianalisis kerataan dan simetri berkas. Terakhir membandingkan data hasil pengukuran yang diperoleh dengan data standar (acuan) pesawat LINAC.

HASIL

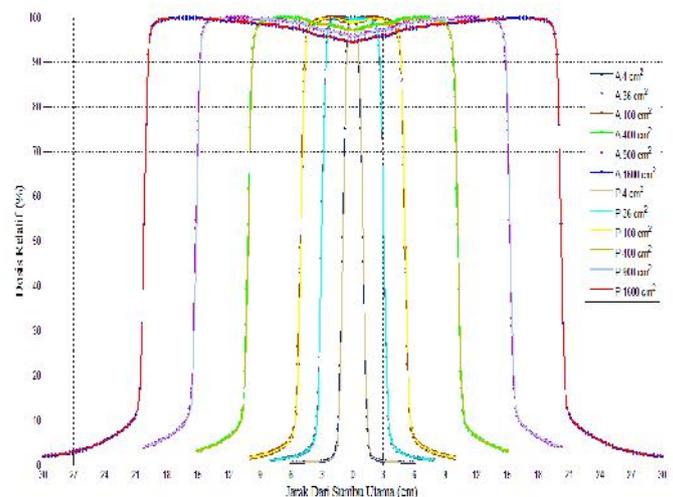
Pengukuran PDD dan *Profile Dose* Sinar-X yang dilakukan dengan berbagai variasi luas lapangan penyinaran. Hasil pengukuran PDD menggunakan *Ionisasi Chamber* dan *Water Phantom* digambarkan grafik hubungan antara PPD dan kedalaman (Gambar 6 - 7) dari PDD hasil pengukuran dengan PDD acuan. Sedangkan Gambar 8 - 9 merupakan grafik hubungan antara dosis relatif dengan jarak dari sumbu utama (lebar lapangan) dari *Profile Dose* hasil pengukuran (P) dengan *Profile Dose* acuan (A).



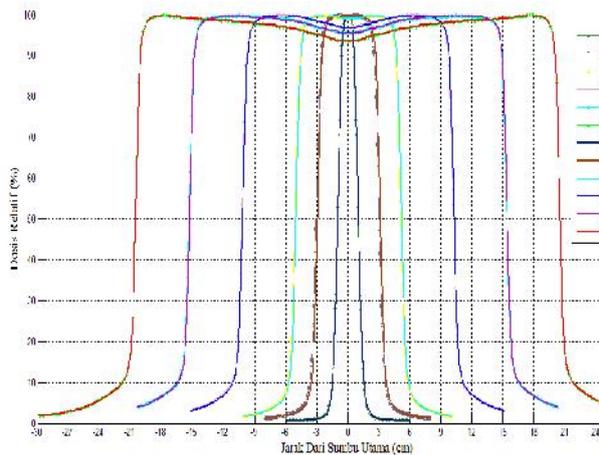
Gambar 4. Grafik PDD berkas Sinar-X 6 MV dengan berbagai luas lapangan penyinaran



Gambar 5. Grafik PDD berkas Sinar-X 10 MV dengan berbagai luas lapangan penyinaran



Gambar 6. Grafik *Profile Dose* berkas Sinar-X 6 MV dengan berbagai luas lapangan penyinaran



Gambar 7. Grafik *Profile Dose* berkas Sinar-X 10 MV dengan berbagai luas lapangan penyinaran

Berdasarkan Gambar 4 dan 5 maka diperoleh kondisi dimana kedalaman dosis maksimum (dosis efektif, D_{dm}) untuk masing-masing luas lapangan penyinaran dari berkas Sinar-X 6 dan 10 MV.

Tabel 2. Perbandingan PDD hasil pengukuran dan PDD acuan untuk berkas Sinar-X 6 MV pada kedalaman D_{dm} .

PDD Berkas Sinar X 6 MV				
Luas Lapangan (cm ²)	Kedalaman D_{dm} (cm)	PDD _P (%)	PDD _A (%)	DP (%)
2 x 2	1,58	99,7	100	0,30
6 x 6	1,58	99,8	100	0,20
10 x 10	1,58	100	100	0
20 x 20	1,38	100	100	0
30 x 30	1,38	100	100	0
40 x 40	1,38	100	100	0

Tabel 3. Perbandingan PDD hasil pengukuran dan PDD acuan untuk berkas Sinar-X 10 MV pada kedalaman D_{dm} .

PDD Berkas Sinar-X 10 MV				
Luas Lapangan (cm ²)	Kedalaman D_{dm} (cm)	PDD _P (%)	PDD _A (%)	DP (%)
2 x 2	2,38	100	100	0
6 x 6	2,38	100	100	0
10 x 10	2,38	100	100	0
20 x 20	2,18	100	100	0
30 x 30	2,18	100	100	0
40 x 40	2,18	100	100	0

Berdasarkan Tabel 2 dan 3 deviasi pengukuran yang paling tinggi adalah 0,3% (berkas Sinar-X 6 MV luas lapangan penyinaran 2 x 2 cm²). Namun, pada dasarnya keseluruhannya masih dalam rentang toleransi (< 2%). Hal ini menunjukkan bahwa PDD masih dalam keadaan optimal. Semakin rendah deviasi pengukuran maka semakin bagus pula hasil yang diperoleh karena semakin mendekati nilai acuannya.

Selain itu diperoleh kedalaman D_{dm} yang berubah seiring berubahnya tegangan dan luas lapangan penyinaran. Dimana nilai D_{dm} semakin tinggi dengan bertambahnya tegangan dan semakin rendah seiring bertambahnya luas lapangan penyinaran. Hal ini disebabkan karena semakin luas lapangan penyinaran maka semakin tinggi pula tegangan yang dibutuhkan agar daya tembus berkas juga semakin tinggi.

Dari Gambar 4 dan 5 dapat kita lihat bahwa semakin tinggi energi (dalam hal ini tegangan) berkas, maka semakin rendah PDD pada permukaan ($d_0 = 0$ cm), hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut energi yang terserap atau yang diterima pada posisi tersebut masih jauh dari dosis yang seharusnya diberikan. Sehingga untuk mencapai kondisi D_{dm} berkas akan bergerak terus hingga mencapai dosis terserap maksimum. Maka dari itu untuk energi yang lebih tinggi akan membutuhkan jarak yang lebih panjang untuk mencapai hal tersebut. Selanjutnya setelah kondisi D_{dm} PDD akan berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

Gambar 6 dan 7 merupakan bentuk muka berkas (*Profile Dose*) yang dengannya dapat dianalisis *Flatness* dan *Symmetry* dari berkas yang diperoleh. Nilai *Flatness* dan *Symmetry* merupakan persentasi deviasi dua titik.^[7] Sehingga deviasi pengukuran merupakan selisih antara deviasi hasil perhitungan baik *Flatness* dan *Symmetry* dengan deviasi acuannya.

Dari Gambar 6 dan 7 diperoleh nilai D_{max} dan D_{min} pada permukaan (80% lebar berkas) *Profile Dose* dari hasil pengukuran dan acuan. Selanjutnya dari nilai D_{max} dan D_{min}

dapat dihitung nilai *Flatness* dari *Profile Dose* menggunakan Persamaan (2).

Tabel 4. Perbandingan *Flatness Profile Dose* hasil pengukuran dan *Profile Dose* acuan untuk berkas Sinar-X 6 MV pada kedalaman D_{dm}

<i>Flatness Profile Dose</i> Berkas Sinar-X 6 MV			
Luas Lapangan (cm ²)	<i>Flatness</i> _{Hitung} (%)	<i>Flatness</i> _{Acuan} (%)	DP (%)
2 x 2	17,74	15,54	2,20
6 x 6	2,07	1,71	0,90
10 x 10	0,8	0,73	0,07
20 x 20	1,52	1,47	0,05
30 x 30	2,2	2,14	0,06
40 x 40	2,88	2,88	0

Tabel 5. Perbandingan *Flatness Profile Dose* hasil pengukuran dan *Profile Dose* acuan untuk berkas Sinar-X 10 MV pada kedalaman D_{dm}

<i>Flatness Profile Dose</i> Berkas Sinar-X 10 MV			
Luas Lapangan (cm ²)	<i>Flatness</i> _{Hitung} (%)	<i>Flatness</i> _{Acuan} (%)	DP (%)
2 x 2	17,67	15,94	1,73
6 x 6	4,21	3,01	1,2
10 x 10	1,06	0,88	0,18
20 x 20	1,63	1,57	0,06
30 x 30	2,35	2,3	0,05
40 x 40	3,06	3,06	0

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai *Flatness* pengukuran dan acuan dimana nilai ini menunjukkan deviasi kerataan berkas yang mewakili kelayakan suatu berkas untuk dapat digunakan. Adapun nilai *Flatness* hasil pengukuran dan acuan kedua jenis berkas untuk luas lapangan 2 x 2 cm² dapat dikategorikan sebagai daerah yang tidak dianjurkan untuk terapi radiasi, karena nilainya yang cukup tinggi (> 5%). Selain itu diperoleh pula nilai deviasi pengukuran *Flatness* yang menunjukkan kondisi pesawat LINAC selama digunakan, dimana nilai yang diperoleh masih dalam rentang toleransi pengukuran, yaitu < 5%. Hal tersebut menunjukkan bahwa *Flatness Profile Dose* masih dalam keadaan baik.

Selain itu dapat dilihat pula nilai *Flatness* mencapai nilai yang mendekati kondisi ideal (nilai *Flatness* rendah) pada luas lapangan 10 x 10 cm² (1,06% dan 0,8%). Sedangkan luas lapangan penyinaran yang lebih rendah dari 10 x 10 cm² nilai *Flatness* yang diperoleh semakin tinggi seiring berkurangnya luas lapangan, hal ini disebabkan karena berkas yang dilewatkan pada *Flattening Filter* tidak terlalu optimal untuk daerah yang sempit (*Under-Flattening*) begitu pula untuk lapangan yang lebih luas dari 10 x 10 cm² (nilai *Flatness* tinggi) hal ini disebabkan karena *Flattening Filter* yang terlalu banyak memotong permukaan berkas (*Over-Flattening*) yang menjadikan daerah sekitar sumbu utama (U) menjadi lebih rendah dibanding daerah pinggir profil berkas Sinar-X.

Selain *Flatness*, dari Gambar 6 dan 7 dapat pula di uji kesesuaian *Profile Dose* antara dosis relatif daerah kiri dan daerah kanan (simetri) dengan menggunakan Persamaan (3).

Tabel 6. Perbandingan sisi kiri dan kanan *Symmetry Profile Dose* hasil pengukuran dan *Profile Dose* acuan untuk berkas Sinar-X 6 MV di kedalaman D_{dm} .

Keseragaman (Simetri) <i>Profile Dose</i> Berkas Sinar-X 6 MV			
Luas Lapangan (cm ²)	<i>Symmetry</i> _{Hitung} (%)	<i>Symmetry</i> _{Acuan} (%)	DP (%)
2 x 2	4,29	0	4,29
6 x 6	1,43	0	1,43
10 x 10	1,04	0	1,04
20 x 20	0,58	0	0,58
30 x 30	0,53	0	0,53
40 x 40	0	0	0

Tabel 7. Perbandingan *Symmetry Profile Dose* hasil pengukuran dan *Profile Dose* acuan untuk berkas Sinar-X 10 MV pada kedalaman D_{dm} .

Keseragaman (Simetri) <i>Profile Dose</i> Berkas Sinar-X 6 MV			
Luas Lapangan (cm^2)	<i>Symmetry</i> _{Hitung} (%)	<i>Symmetry</i> _{Acuan} (%)	DP (%)
2 x 2	4,58	0	4,58
6 x 6	3,76	0	3,76
10 x 10	2,19	0	2,19
20 x 20	0,48	0	0,48
30 x 30	0,38	0	0,38
40 x 40	0	0	0

Berdasarkan Tabel 6 dan 7 dapat dilihat nilai simetri pengukuran dan acuan serta deviasi pengukuran antara keduanya, dimana nilai simetri pengukuran yang sekaligus mewakili nilai DP yang diperoleh cukup tinggi untuk luas lapangan yang rendah. Pada luas lapangan 2 x 2 cm^2 berkas Sinar-X 6 MV diperoleh nilai S jika dirata-ratakan sebesar 4,29 %, sedangkan pada berkas Sinar-X 10 MV untuk luas lapangan yang sama (2 x 2 cm^2) diperoleh S rata-rata 4,58%. Namun, hasil yang diperoleh tersebut masih dalam batas toleransi pengukuran *Symmetry* ($S < 5\%$).

Pada tabel yang sama (Tabel 6 dan 7) dapat dilihat bahwa nilai yang diperoleh semakin rendah seiring bertambahnya luas lapangan penyinaran. Hal ini disebabkan karena penyimpangan berkas terhadap sumbu utama berkas yang jika dibandingkan dengan luas lapangan penyinaran yang besar maka tidak akan memberikan pengaruh yang besar, sebaliknya akan memberikan pengaruh yang besar untuk luas lapangan yang kecil.

Dari keseluruhan hasil pengukuran yang dilakukan pada pesawat LINAC untuk PDD, semuanya masih dalam keadaan standar toleransi ($< 2\%$). Seperti halnya PDD untuk nilai *Profile Dose* (kerataan dan simetri) berkas yang diperoleh masih dalam keadaan standar toleransi ($< 5\%$), sebagaimana yang diungkapkan oleh Khan^[5] bahwa untuk

penggunaan radiasi pada kanker/tumor nilai batas toleransi maksimum untuk penggunaan radiasi adalah 5%. Hal ini menunjukkan bahwa pesawat LINAC masih dalam keadaan optimal (baik).

KESIMPULAN

Berdasar pada penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai

berikut:

1. Nilai PDD berkas Sinar-X pesawat LINAC masih sesuai dengan standar. Sebagaimana deviasi pengukuran yang diperoleh berkisar antara 0% - 0,3% dengan batas toleransi 2%.
2. Nilai *Profile Dose* (kerataan dan simetri) berkas Sinar-X pesawat LINAC masih sesuai dengan standar. Dimana deviasi pengukurannya berkisar antara 0% - 2,2%, sedangkan simetrinya berkisar antara 0% - 4,58% dengan batas toleransi 5%.
3. Pada PDD pesawat LINAC, kedalaman dosis maksimum D_{dm} pada berkas Sinar-X bertambah seiring dengan kenaikan energi, dan berkurang dengan bertambahnya luas lapangan penyinaran.
4. Nilai *Flatness* yang diperoleh dari hasil pengukuran dan acuan untuk luas lapangan penyinaran 2 x 2 cm^2 atau lebih kecil tidak dianjurkan untuk digunakan dalam terapi radiasi karena permukaan berkasnya yang tidak cukup datar (rata), dimana diperoleh nilai *Flatness* lebih dari 15% dengan batas toleransi 5%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suyatno. F, *Aplikasi Radiasi Sinar-X Di Bidang Kedokteran Untuk Menunjang Kesehatan Masyarakat*, Banten, Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir-BATAN, 2008
- [2] KABAPETEN, *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2006 Tentang Laboratorium Dosimetri, Kalibrasi Alat Ukur*

Radiasi Dan Keluaran Sumber Radiasi Terapi Dan Standardisasi Radionuklida, Jakarta, BAPETEN, 2006

- [3] Suharni dkk, *Analisis Hasil Pengukuran Percentage Depth Dose (PDD) Berkas Elektron LINAC Elekta RSUP Dr. Sardjito*, Yogyakarta, Universitas Gadjah Mada, 2013
- [4] Damanik. YMK, *Analisis Karakteristik Profil PDD (Percentage Depth Dose) Berkas Foton 6 MV Dan 10 MV*, Medan, Universitas Sumatera Utara, 2011
- [5] Alatas. Z, dkk, *Buku Pintar Nuklir*, Banten, Batan, 2008
- [5] Khan. FM, *The Physics of Radiation Therapy, 3rd ed*, Amerika Serikat, Lippincott Williams and Wilkins, 2003.
- [6] Germano. IM, *LINAC and Gamma Knife Radiosurgery*, Amerika Serikat, *The American Association of Neurological Surgeons*, 2010.
- [7] Podgorsak. EB, *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, International Atomic Energy Agency, Austria, Vienna, 2005.
- [8] Fadriahz. D, *Distribusi Dosis untuk Lapangan Asimetri Sinar-X 6 MV dengan Variasi Kedalaman*, Jakarta, Universitas Indonesia, 2010.
- [9] Fiqron. *Pengukuran Faktor Keluaran Berkas Sinar X 6 MV dan 10 MV Produksi LINAC Varian 2100C*, Depok, Universitas Indonesia, 2007
- [10] Svensson. GK dkk, *Physical Aspects of Quality Assurance in Radiation Therapy*, Amerika Serikat, *American Association of Physicist in Medicine*, 1994
- [11] D. Syamsir, Armynah. B, Jusmawang, akan dipublikasikan tahun 2015 atau tahun 2016