



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERBANDINGAN HASIL PENGUKURAN PARAMETER
BERKAS SINAR-X DAN ELEKTRON
KELUARAN PESAWAT LINAC MENGGUNAKAN
DETEKTOR MATRIKS DAN FANTOM AIR**

TESIS

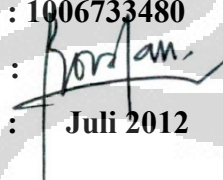
Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

**DWI BONDAN PANULAR
1006733480**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA KEKHUSUSAN FISIKA
MEDIS
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Dwi Bondan Panular
NPM : 1006733480
Tanda Tangan : 
Tanggal : Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Dwi Bondan Panular
NPM : 1006733480
Program Studi : Magister Fisika Medis
Judul Tesis : Perbandingan Hasil Pengukuran Parameter Berkas Sinar-X dan Elektron Keluaran Pesawat Linac menggunakan Detektor Matriks dan Fantom Air.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada program Studi Fisika Medis, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Djarwani S. Soejoko (.....)

Penguji : Prof. Dr. Wahyu Setiabudi (.....)

Penguji : Dr. Warsito (.....)

Penguji : Dr. Supriyanto Ardjo Pawiro (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : Juli 2012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga tesis ini dapat diselesaikan. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Fisika Medis pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Saya menyadari tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangat sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Djarwani S. Soejoko, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
- (2) Kementerian Pertahanan yang telah memberikan ijin untuk tugas belajar.
- (3) Direktorat Kesehatan Angkatan Darat yang telah mengizinkan penulis untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang magister.
- (4) RSPAD Gatot Soebroto Ditkesad yang telah mengizinkan penulis untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi.
- (5) Instalasi Radionuklir RSPAD khususnya bagian radioterapi, yang menjadi tempat bekerja dan penelitian penulis.
- (6) Para staf pengajar Program Magister Fisika Medis UI.
- (7) Kedua orang tua yang selalu mendo'akan keberhasilan saya.
- (8) Putri-putri tercinta, Annisa Luthfianti, Keke Almaida, Kiki Nur'aini dan si bungsu Khansa Aida. Mereka adalah anak-anak terbaik, semoga Allah SWT selalu melindungi mereka dunia dan akirat.
- (9) Teman-teman Pasca Fisika Medis, **Asri Kunto Ipoel Arif Male Zainal Jonlin Yaya Leni Misju**, sukses buat kalian semua dan tetap semangat.
- (10) Orang-orang yang selalu membuat saya tetap tegar dan semangat.

Akhir kata, saya berdoa agar Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung atau tidak langsung. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Dwi Bondan Panular
NPM : 1006733480
Program Studi : Fisika Medis
Departemen : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Fakultas : Fisika
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Perbandingan Hasil Pengukuran Parameter Berkas Sinar-X dan Elektron
Keluaran Pesawat Linac menggunakan Detektor Matriks dan Fantom Air**

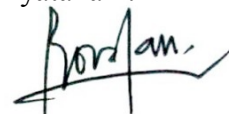
Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal :

Yang menyatakan :



(Dwi Bondan Panular)

ABSTRAK

Nama : Dwi Bondan Panular
Program Studi : Fisika Medis
Judul : Perbandingan Hasil Pengukuran Parameter Berkas Sinar - X dan Elektron Keluaran Pesawat Linac menggunakan Detektor Matriks dan Fantom Air.

Tesis ini membahas tentang perbedaan hasil pengukuran keluaran *linac precise system* di RSPAD Gatot Soebroto menggunakan detektor matriks PTW dan fantom air, untuk sinar-x pengukuran dilakukan pada lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dengan SSD 100 cm sedangkan untuk elektron menggunakan aplikator $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dengan SSD 95 cm, dosis yang diberikan 1 Gray (100 MU) pada kedalaman maksimum. PDD untuk sinar-x dan elektron yang dihasilkan dari pengukuran detektor matriks memiliki rentang yang lebih pendek pada daerah kedalaman maksimum dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan fantom air, dengan rentang perbedaan 4 mm – 5 mm untuk sinar x dan 3 mm – 6 mm untuk elektron. Sedangkan profil dosis untuk berkas sinar-x antara detektor matriks dengan fantom air memiliki kesesuaian pada daerah lapangan penyinaran dengan perbedaan kurang dari 2 %. Untuk berkas elektron terjadi perbedaan yang signifikan dengan bertambahnya kedalaman, sehingga dapat disimpulkan bahwa detektor matriks dapat digunakan untuk verifikasi penyinaran pada daerah target volume penyinaran (*Gross Tumour Volume/GTV*) tetapi kurang baik untuk daerah organ sekitarnya (*Organ at Risk/OAR*). Detektor matriks lebih baik apabila digunakan untuk sinar-x, tetapi kurang baik digunakan untuk elektron.

Kata kunci :

2D array, detektor matriks, *linac*, PDD, profil dosis

ABSTRACT

Name : Dwi Bondan Panular
Study Course : Physics – Medical Physics
Title : Comparison of Measurement Results Parameter of X - Ray and Electron Linac Output Using the Detector Matrix and Water Phantom.

This thesis discusses about output differences of Elekta Precise linac treatment system on Gatot Subroto Army Hospital between the use of matrix detector and water phantom, for x-ray measurement performed on $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size with a SSD 100 cm, as well as electron measurement using the applicator $10 \times 10 \text{ cm}^2$ with SSD 95 cm, both on the given dose of 1 Gray (100 MU) in the maximum depth. PDD for x-rays and electrons from the measurement of the matrix detector has shorter range in comparison to the maximum depth of measurement results with the water phantom. The range of difference is found to be 4 mm - 5 mm for x-rays and 3 mm - 6 mm for the electrons. Dose profile for x-ray measurement using the matrix detector is having compatibility with water phantom measurement at the irradiation field, with the difference found to be less than 2%. For the electron beam, significant difference occurs with increasing depth, leading to the conclusion that the matrix detector can be used to verify radiation on the Gross Tumour Volume (GTV), while being not good enough for the Organ at Risk (OAR). The matrix detector is better used for x-rays measurement, with relatively poor compatibility for electron measurement.

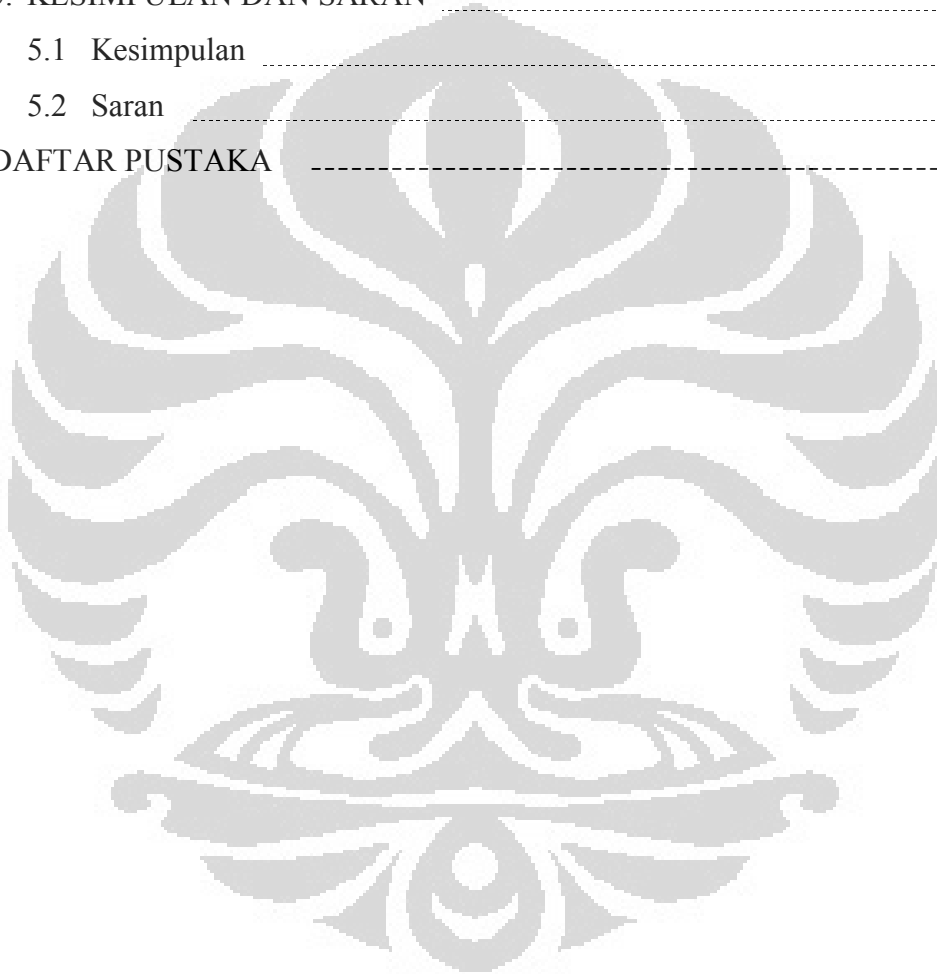
Key words:

2D array, dose profile, linac, matrix detector, PDD

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 LatarBelakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Interaksi sinar Gamma dan Sinar-X	4
2.2 <i>Linear Accelerator</i>	6
2.3 Kepala Linac (<i>Head Linac</i>)	7
2.4 Fantom	8
2.5 Bilik Ionisasi	9
2.6 PDD (<i>Percentage Depth Dose</i>)	9
2.7 Dosis <i>Buildup</i>	10
2.8 Rasio pada Sumbu Utama dan Profil Berkas	11
2.9 Kerataan Berkas (<i>Beam Flatness</i>)	11
2.10 Simetri Berkas (<i>Beam Symetry</i>)	12
3. METODE PENELITIAN	13
3.1 Peralatan	13
3.2 Metoda Penelitian	13

4. HASIL dan PEMBAHASAN	15
4.1 Hasil Pengukuran PDD berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV	15
4.2 Hasil Pengukuran profil dosis berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV.....	17
4.3 Hasil Pengukuran PDD berkas elektron 4 MeV - 15 MeV	19
4.4 Hasil Pengukuran profil dosis berkas elektron 4 MeV - 15 MeV.....	20
4.5 Pembahasan	23
5. KESIMPULAN DAN SARAN	26
5.1 Kesimpulan	26
5.2 Saran	26
DAFTAR PUSTAKA	27

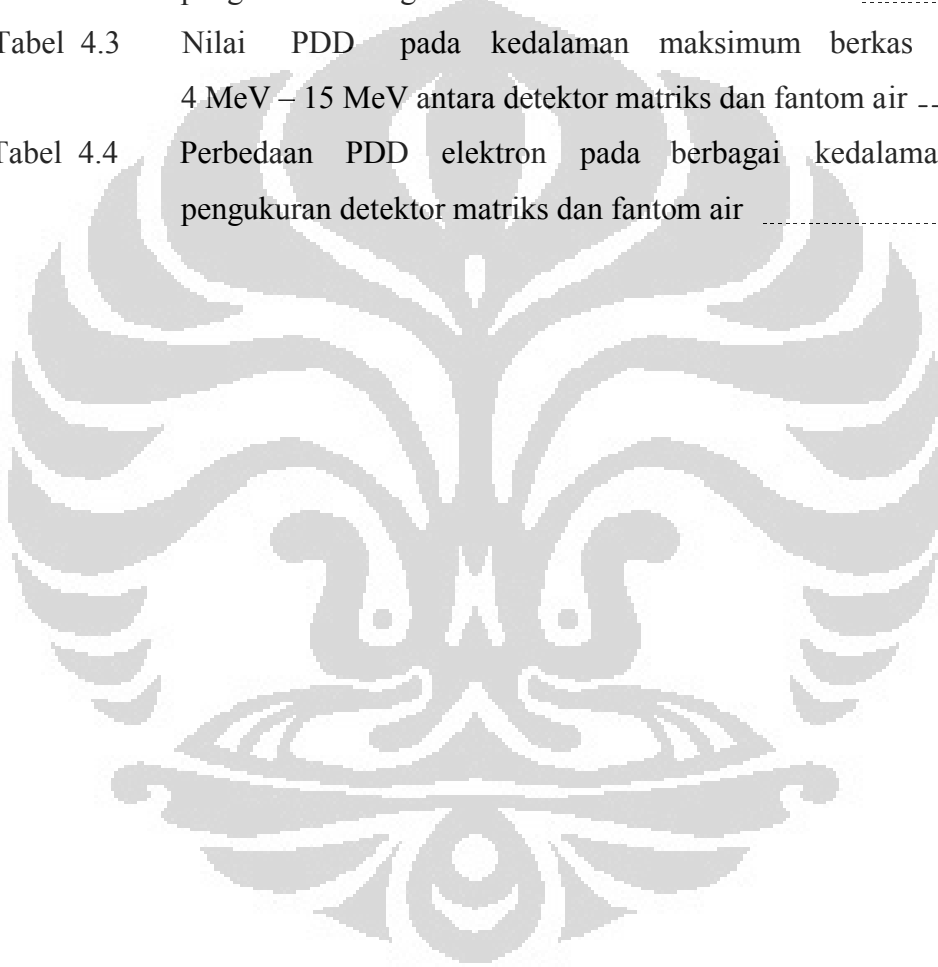


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Efek fotolistrik	4
Gambar 2.2	Skema umum diagram interaksi foton dengan atom	6
Gambar 2.3	Ilustrasi umum dari Linear Accelerator (Linac)	7
Gambar 2.4	Skema yang menunjukkan komponen dasar pada bagian kepala linear accelerator.....	8
Gambar 2.5	Desain dasar cylindrical farmer tipe bilik ionisasi	9
Gambar 2.6	Penghitungan PDD	10
Gambar 3.1	Skema pengukuran untuk berkas sinar-x menggunakan detektor matriks	14
Gambar 4.1	Perbandingan PDD berkas sinar x 6 MV antara metoda matriks dan fantom air	15
Gambar 4.2	Perbandingan PDD berkas sinar x 10 MV antara metoda matriks dan fantom air	16
Gambar 4.3	Profil dosis berkas sinar-x 6 MV antara detektor matriks dan fantom air pada variasi kedalaman	18
Gambar 4.4	Perbandingan PDD berkas elektron 10 MeV antara detektor matriks dan fantom air	19
Gambar 4.5	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 10 MeV pada variasi kedalaman	26

DAFTAR TABEL

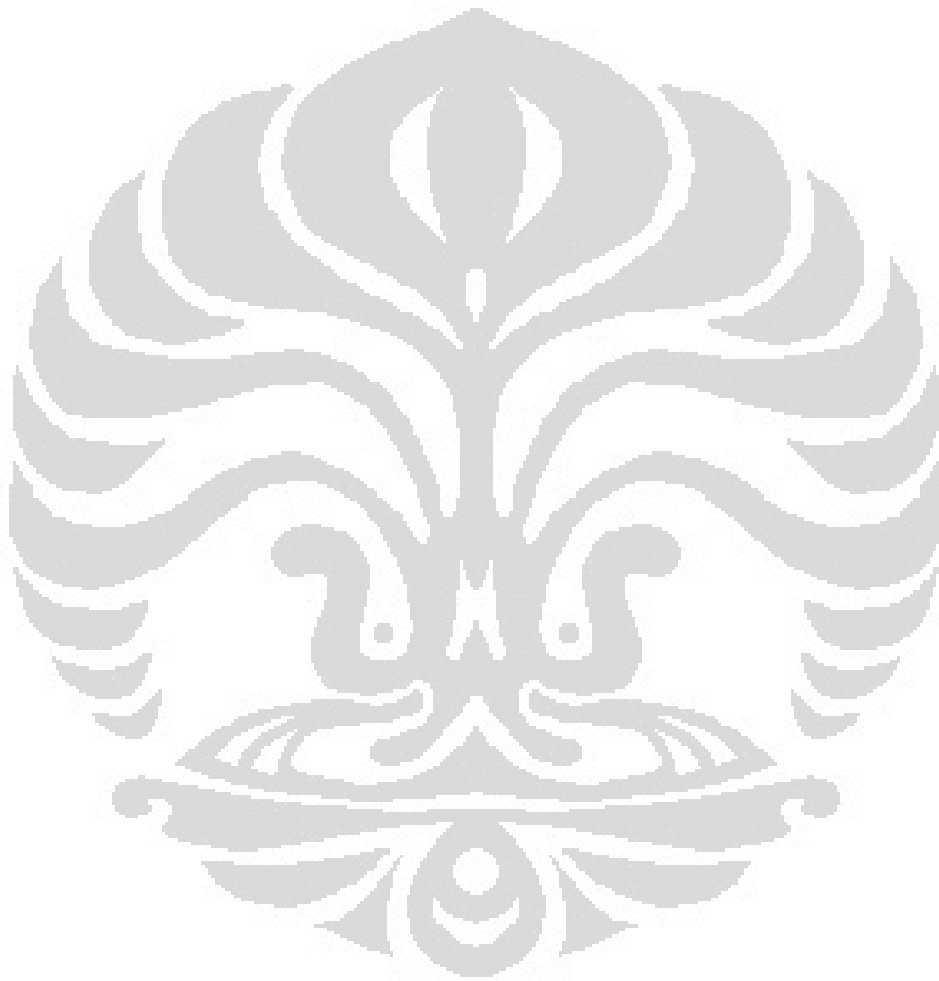
Tabel 3.1	Variasi kedalaman pengukuran pada sumbu utama berkas elektron dengan detektor matriks	14
Tabel 4.1	Nilai PDD pada kedalaman maksimum dan nilai pada kedalaman 10 cm berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV	16
Tabel 4.2	Perbedaan PDD sinar-x pada berbagai kedalaman hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air	19
Tabel 4.3	Nilai PDD pada kedalaman maksimum berkas elektron 4 MeV – 15 MeV antara detektor matriks dan fantom air	20
Tabel 4.4	Perbedaan PDD elektron pada berbagai kedalaman hasil pengukuran detektor matriks dan fantom air	23



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil pengukuran PDD sinar-x 6 MV dengan detektor matriks	30
Lampiran 2	Hasil pengukuran PDD sinar-x 10 MV dengan detektor matriks	33
Lampiran 3	Hasil pengukuran PDD sinar-x 6 MV dan 10 MV menggunakan fantom air	37
Lampiran 4	Hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 6 MV pada variasi kedalaman 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	40
Lampiran 5	Hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 10 MV pada variasi kedalaman 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	44
Lampiran 6	Hasil pengukuran PDD menggunakan detektor matriks untuk berkas elektron 4 MeV - 15 MeV.	48
Lampiran 7	Hasil pengukuran PDD menggunakan fantom air untuk berkas elektron 4 MeV - 15 MeV.	50
Lampiran 8	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 4 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm dan 1,5 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	56
Lampiran 9	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 6 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm dan 1,5 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	58
Lampiran 10	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 8 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	60
Lampiran 11	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 10 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	63
Lampiran 12	Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 12 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.	66

Lampiran 13 Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 15 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 em, 1,5 em, 2,5 em dan 3,5 em menggunakan detektor matriks dan fantom air. 69



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radioterapi adalah metode pengobatan penyakit kanker dengan menggunakan sinar pengion. Pengobatan ini bertujuan untuk menghancurkan sel-sel tumor dengan memberikan dosis yang maksimal pada volume target penyinaran tanpa menyebabkan kerusakan yang berarti pada jaringan normal sekitarnya^{[7][19][20]}. Sinar pengion yang digunakan untuk penyinaran dapat berasal dari sumber radioaktif atau dari mesin pemercepat elektron (*Linear Accelerator/ Linac*). Untuk memperoleh kualitas sinar pengion yang sesuai dengan standar internasional (IAEA) maka perlu dilakukan pengukuran keluaran linac, pada umumnya pengukuran menggunakan medium air. Hasil yang didapatkan dari pengukuran pada medium air, dimasukkan pada data sistem perencanaan penyinaran (*Treatment Planning System/TPS*).

Parameter yang didapatkan dari pengukuran keluaran linac adalah persentase dosis kedalaman (*Percentage Depth Dose/PDD*) yang merupakan normalisasi persentase distribusi dosis pada sumbu utama penyinaran pada tubuh manusia atau fantom terhadap nilai dosis maksimum (D_{max}). Kurva *PDD* merupakan profil dosis bervariasi terhadap kedalaman^{[14][18][21]}. Selain fantom air, beberapa jenis fantom juga dapat digunakan untuk membuat verifikasi perencanaan penyinaran, salah satunya adalah fantom 2D Array seven 29 PTW atau detektor matriks. Pada umumnya penggunaan 2D Array adalah untuk verifikasi perencanaan radioterapi khusus seperti IMRT (*Intensity-Modulated Radiation Therapy*), IGRT (*Image-Guided Radiotherapy*), dan VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*). Beberapa jurnal seperti, E Spezi *et al.*^[27], D Letourneau *et al.*^[16], J S Tsai *et al.*^[29] dalam publikasinya tentang verifikasi radiotherapi menggunakan 2D Array untuk verifikasi dosis pada teknik IMRT dan IGRT.

Informasi yang didapat menjadi dasar penelitian penulis untuk melakukan pengukuran PDD dan profil dosis keluaran linac dengan menggunakan detektor matriks (2D Array seven29) PTW. Hasil pengukuran menggunakan detektor

matriks tersebut akan dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan fantom air. Hasilnya akan dianalisis perbedaan PDD dan profil dosis keluaran linac berkas sinar-x dan elektron dari kedua metoda pengukuran tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimanakah akurasi detektor 2D Array dapat digunakan untuk memverifikasi PDD dan profil keluaran linac yang direlatifkan terhadap hasil pengukuran dengan detektor ionisasi pada fantom air.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan untuk memperoleh kurva PDD dan Profil dosis pada semua berkas sinar-x (6 MV dan 10 MV) dan elektron (4, 6, 8, 10, 12 dan 15 MeV) pada pesawat *linac elekta precise system* di bagian Radioterapi RSPAD Gatot Soebroto Jakarta dengan menggunakan detektor matriks. Berkas elektron menggunakan aplikator $10 \times 10 \text{ cm}^2$, dengan SSD 95 cm, sedangkan sinar-x menggunakan luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dan SSD 100 cm.

1.4 Tujuan Penelitian

Dapat menyajikan gambaran profil dosis dan PDD dari kedua metode, sehingga dapat menarik kesimpulan apakah detektor 2D Array dapat digunakan untuk memverifikasi keluaran berkas linac.

1.5 Sistematika Penulisan

Tesis ini dibagi menjadi 5 bab, yang terdiri dari beberapa sub-bab untuk mempermudah penjelasan. Penulisan bab-bab dilakukan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, tujuan penelitian yang hendak dicapai, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang dasar teori yang menunjang penelitian antara lain interaksi radiasi dengan materi, linear accelerator, dosimetri, detektor matriks dan Fantom air.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan alat serta bahan yang digunakan dalam penelitian serta metode dalam pengambilan data.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang data-data hasil penelitian serta analisa data dalam bentuk tabel, kurva dan pembahasan dari semua data yang diperoleh dari proses penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini penulis merangkum hasil yang didapatkan dari penelitian kemudian ditambahkan dengan saran untuk meningkatkan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Interaksi Sinar Gamma dan Sinar-X

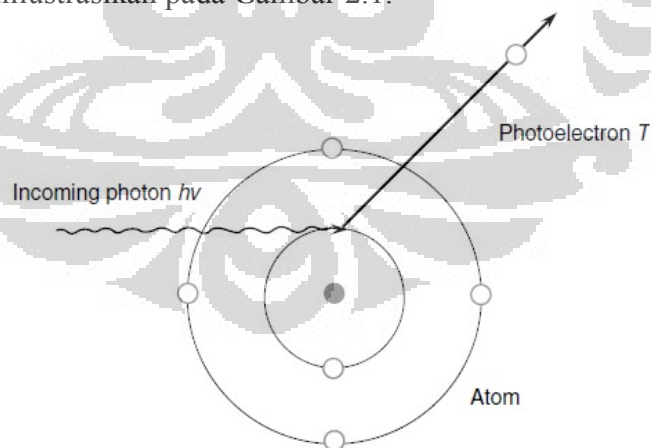
Sinar- γ dan sinar-x merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang tidak mempunyai massa maupun muatan listrik. Proses interaksi antara sinar- γ dan sinar-x dengan materi adalah efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan. Probabilitas terjadinya antara tiga proses tersebut sangat ditentukan oleh energi radiasi dan jenis materi (nomor atom) penyerapnya ^{[2][18][21]}.

2.1.1 Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik terjadi akibat adanya interaksi antara foton dengan elektron pada suatu bahan. Pada peristiwa ini energi foton diserap seluruhnya oleh elektron yang terikat kuat oleh suatu atom, sehingga elektron terlepas dari ikatan inti atom. Elektron yang terlepas disebut fotoelektron, dengan energi kinetik sebesar :

$$T = h\nu - E_B$$

$h\nu$ adalah energi foton yang berinteraksi, dan E_B adalah energi ikat elektron ^[18]. Efek fotolistrik diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Efek fotolistrik, sebuah foton yang datang dengan energi sebesar $h\nu$ berinteraksi dengan atom dan mengeluarkan sebuah fotoelektron dengan energi kinetik sebesar T . [diambil dari, Mayles P, Nahum A, Rosenwald JC, “*Handbook of Radiotherapy Physics, Theory and Practice*”, hal.60]

Efek fotolistrik terjadi pada foton berenergi rendah (0,01 MeV – 0,5 MeV) dan dominan pada foton dengan energi kurang dari 0,1 MeV. Radiasi elektromagnetik dengan energi foton yang kecil akan berinteraksi dengan elektron-elektron pada orbit terluar, semakin besar energi foton maka elektron-elektron yang berada pada orbit lebih dalam akan dilepaskan. Efek foto listrik ini umumnya terjadi pada materi dengan nomor atom (Z) yang besar ^{[18][21]}

2.1.2 Hamburan Compton

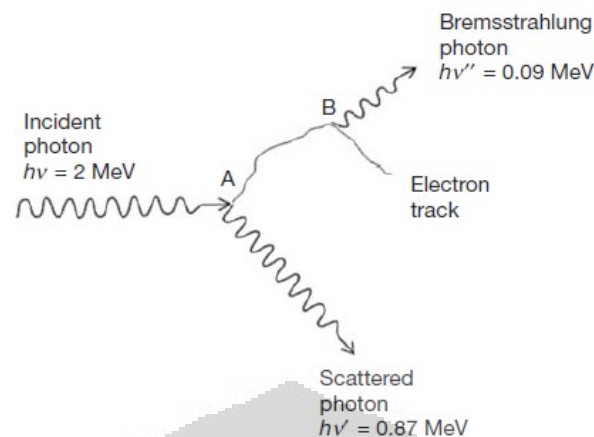
Hamburan Compton terjadi apabila foton dengan energi sebesar $h\nu$ berinteraksi dengan elektron bebas atau elektron yang tidak terikat secara kuat oleh inti, yaitu elektron yang berada pada kulit terluar dari atom. Elektron tersebut dilepaskan dari ikatan inti atom dan bergerak dengan energi kinetik tertentu disertai foton lain dengan energi lebih rendah dibandingkan foton datang. Energi kinetik elektron (E_e) adalah selisih energi foton masuk dan foton keluar.

$$E_e = h\nu_i - h\nu_o$$

Hamburan Compton sangat dominan terjadi bila foton berenergi sedang (lebih dari 0,5 MeV) dan lebih banyak terjadi pada material dengan nomor atom (Z) yang rendah ^{[2][4][18]}.

2.1.3 Produksi pasangan

Produksi pasangan terjadi karena interaksi antara foton dengan medan listrik dalam inti atom berat. Jika interaksi itu terjadi, maka foton akan lenyap dan sebagai gantinya akan timbul sepasang elektron-positron. Karena massa diam elektron atau positron ekuivalen dengan 0,51 MeV, maka produksi pasangan hanya dapat terjadi pada energi foton yang datang lebih dari 1,02 MeV ^{[2][4][18]}. Proses terjadinya produksi pasangan dan hamburan Compton diilustrasikan pada Gambar 2.2.

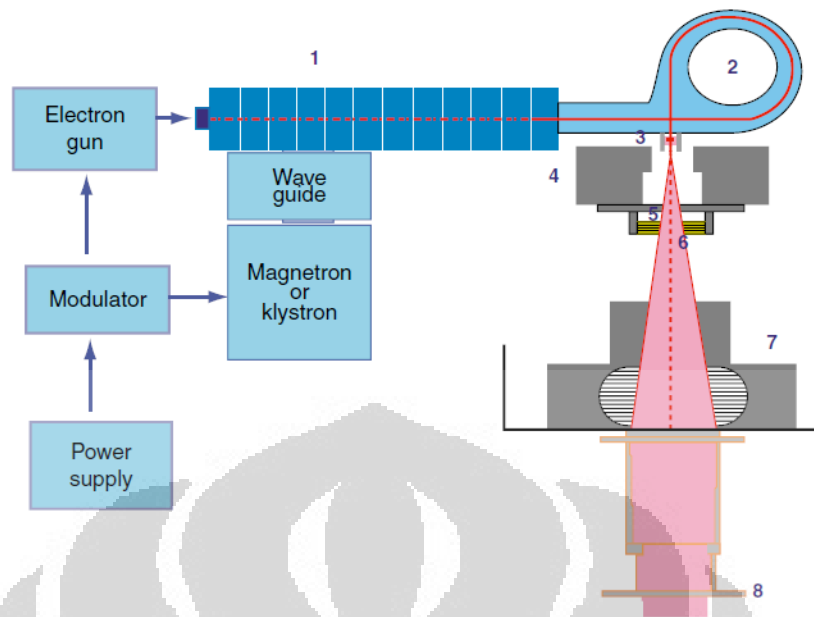


Gambar 2.2 Skema umum diagram interaksi foton dengan atom. Pada contoh diatas, suatu foton dengan energi ($h\nu$) 2 MeV berinteraksi dengan atom Pb (timbal). Pada titik A, foton 2 MeV berinteraksi dengan atom menghasilkan efek fotolistrik, hamburan Rayleigh, efek Compton atau produksi pasangan. Namun, untuk sejumlah besar energi foton 2 MeV, bisa dinyatakan bahwa rata-rata: 1,13 MeV akan ditransfer pada titik A ke partikel bermuatan; 0,87 MeV akan tersebar melalui Rayleigh dan hamburan Compton ($h\nu'$). Dari 1,13 MeV dipindahkan ke partikel bermuatan: 1,04 MeV akan diserap, dan 0,09 MeV akan dipancarkan dalam foton bremsstrahlung ($h\nu''$). [Podgorsak E.B, "Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Student, hal. 41]

2.2 Linear Accelerator (*Linac*)

Linac adalah suatu alat yang menggunakan frekuensi gelombang elektromagnetik tinggi, bertujuan mempercepat elektron menjadi energi tinggi melalui tabung linear. Elektron yang mempunyai energi tinggi tersebut dapat digunakan langsung untuk mengobati tumor pada permukaan, atau dapat juga dikenakan ke suatu target untuk memproduksi sinar-x yang akan digunakan untuk mengobati tumor yang berada jauh dari permukaan tubuh^{[14][21]}.

Linac merupakan mesin pemercepat elektron dengan energi kinetik 4 MeV sampai dengan 25 MeV. Elektron dipercepat menggunakan *microwave* RF non konservatif berfrekuensi antara 10^3 MHz (L-Band) sampai 10^4 MHz (X-Band). Komponen utama linac biasanya dikelompokkan menjadi 6 bagian, yaitu : (1) Sistem Injeksi ; (2) Radio Frekuensi; (3) *Accelerating Wave Guide*; (4) Sistem Pelengkap (*auxiliary*); (5) *Beam Transport*; (6) *Beam collimating and monitoring*^[20].



Gambar 2.3. Ilustrasi umum dari linear accelerator. (1) produksi dan pemercepat elektron, (2) bending magnet, (3) target dan filter primer, (4) collimator primer, (5) filter utama, (6) ionisasi chamber, (7) multi-leaf collimator (MLC), (8) applicator. [diambil dari, Murat B, Gokhan O, Cuneyt E, *Basic Radiation Oncology*, p 32]

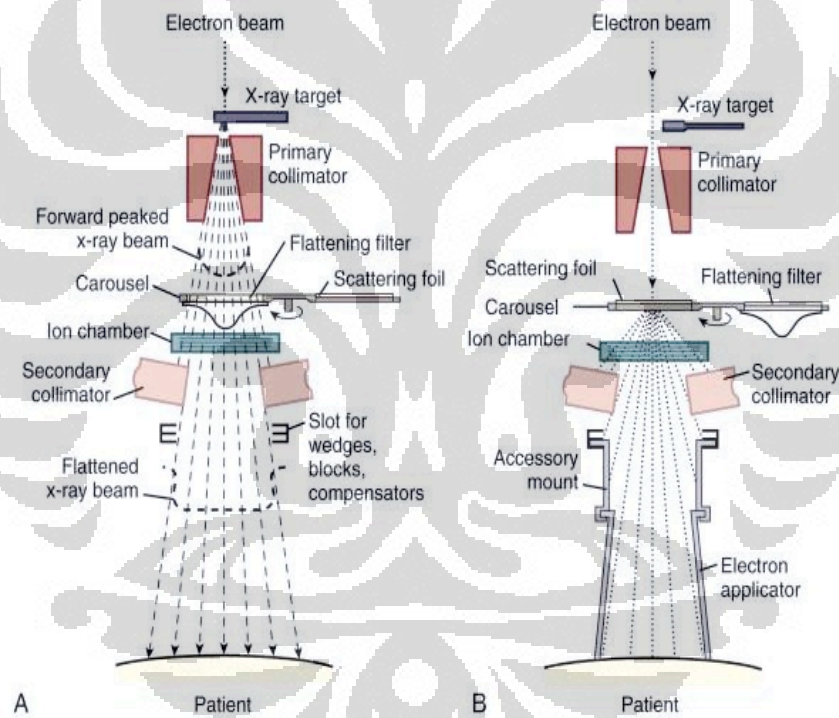
Akselerator digunakan dalam radioterapi untuk mempercepat elektron dengan menggunakan frekuensi dalam rentang gelombang mikro sekitar 300 megasiklus/sec. Power supply menyediakan arus DC ke modulator yang membentuk pulsa tegangan tinggi yang kemudian dihantarkan ke *magnetron/klystron* dan *electron gun*. *Magnetron/klystron* kemudian menghasilkan pulsa gelombang mikro yang kemudian diinjeksi ke akselerator melalui tabung akselerator dengan sistem *wave guide*. Pada waktu yang sama, elektron yang dihasilkan dari *electron gun* diinjeksi ke dalam tabung akselerator. Elektron dengan energi tertentu ($\sim 50\text{keV}$) berinteraksi dengan medan elektromagnetik dari tabung gelombang mikro menyebabkan elektron-elektron tersebut dipercepat ke jangkauan energi yang lebih besar ^[14].

2.3 Kepala Linac (*Head Linac*)

Bagian kepala Linac terdiri dari beberapa komponen yang mempengaruhi produksi, pembentukan, lokalisasi dan pemantauan berkas elektron. Elektron yang berasal dari *elektron gun* dipercepat dalam *accelerating waveguide*

dengan energi kinetik yang diinginkan dan kemudian dibawa dalam bentuk berkas sempit melalui sistem transportasi berkas ke dalam kepala linac.

Berkas sinar-x diproduksi dengan kombinasi *target flattening filter* sedangkan produksi berkas elektron tanpa menggunakan *target flattening filter*. Kolimator utama (*primary collimator*) mendefinisikan bidang lingkaran maksimum, yang selanjutnya dipotong dengan kolimator persegi panjang terdiri dari dua di bagian atas dan dua di bagian bawah, menghasilkan bidang lapangan empat persegi panjang dan bidang persegi dengan dimensi maksimum $40 \times 40 \text{ cm}^2$. *Dual transmission ionization chamber* digunakan untuk memantau berkas keluaran sinar-x dan elektron serta kerataan berkas ^[14].



Gambar 2.4. Skema yang menunjukkan komponen dasar pada bagian kepala linear accelerator. **A**, Komponen untuk menghasilkan sinar-x. **B**, Komponen untuk menghasilkan elektron (diambil dari Khan FM: *The physics of radiation therapy*, ed 4, Philadelphia, 2010, Lippincott Williams & Wilkins, p 42.)

2.4 Fantom

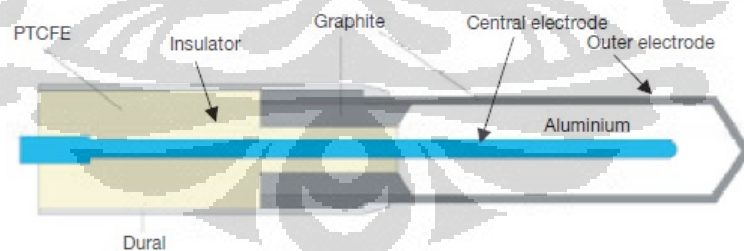
Untuk mengetahui perubahan kuantitas berkas, biasanya pasien diganti dengan fantom, yakni medium yang mempunyai sifat menyerap dan menghamburkan berkas mendekati jaringan tubuh. Air adalah bahan fantom

standar untuk pengukuran dosimetri dari berkas sinar-x dan elektron, air juga sebagai bahan pengganti jaringan lunak yang paling universal. Secara umum air menyerap sinar-x mendekati jaringan, sehingga banyak digunakan sebagai fantom. Selain itu, digunakan pula fantom padat dengan densitas yang mendekati jaringan tubuh manusia ^[21].

2.5 Bilik ionisasi

Bilik ionisasi digunakan dalam radioterapi untuk menentukan dosis radiasi. Sebuah bilik pengion pada dasarnya adalah sebuah ruang gas dikelilingi oleh dinding luar yang konduktif dan memiliki pusat pengumpulan elektroda. Dinding dan pengumpulan elektroda dipisahkan dengan isolator kualitas tinggi untuk mengurangi kebocoran arus ketika tegangan polarisasi diterapkan pada bilik tersebut. Sebuah elektroda yang biasanya diletakkan dalam bilik berfungsi untuk mengurangi kebocoran. Elektroda ini menyadap kebocoran arus dan memungkinkan untuk mengalirkan arus yang bocor ke tanah (*ground*), melewati elektroda pengumpul ^[21].

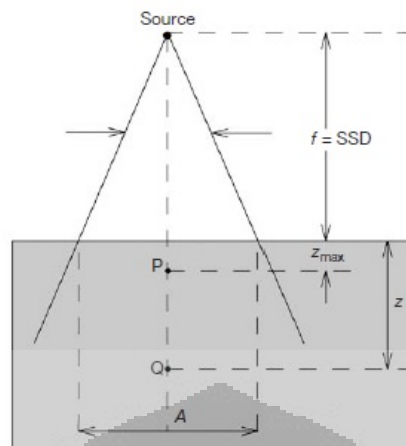
Pengukuran dengan kamar ionisasi di ruang terbuka memerlukan koreksi suhu dan tekanan untuk menjelaskan perubahan dalam massa udara di volume bilik ionisasi, yang akan berubah terhadap suhu lingkungan dan tekanan.



Gambar 2.5. desain dasar cylindrical farmer tipe bilik ionisasi (diambil dari *E.B. Podgorsak: Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA Vienna 2005, p 77.*)

2.6 PDD (*Percentage Depth Dose*)

Distribusi dosis pada sumbu utama dalam pasien atau fantom dikenal sebagai *PDD (percentage depth dose)*, umumnya dinormalisasikan dengan dosis maksimum (D_{maks}) = 100%, yakni dosis pada kedalaman maksimum (d_{maks}).



Gambar 2.6. Penghitungan *PDD*, titik Q menunjukkan kedalaman pada z cm sedangkan titik P adalah kedalaman maksimum (z_{\max}), luas lapangan adalah A . (diambil dari *E.B. Podgorsak: Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA Vienna 2005, p 180.*)

Dosis di titik Q berasal dari radiasi berkas primer dan radiasi hambur. Komponen radiasi primer berkontribusi pada *PDD* secara teori dinyatakan sebagai berikut :

$$PDD_{\text{primer}} = 100 \frac{D_Q^{\text{primer}}}{D_P^{\text{primer}}} = 100 \frac{f^2 z_{\max}^2 e^{-\mu_{\text{eff}} z_{\max}}}{f^2 z^2}$$

μ_{eff} adalah koefisien atenuasi efektif linear radiasi primer dalam fantom (untuk radiasi gamma ^{60}Co harga μ_{eff} dalam air adalah 0.0657 cm^{-1}). Kedalaman maksimum dan dosis permukaan atau dosis kulit tergantung pada energi radiasi, energi sinar-x yang meningkat menyebabkan kenaikan kedalaman maksimum dan menurunkan dosis permukaan.

- ⊙ Untuk z , f , dan $h\nu$ konstan, *PDD* meningkat dengan kenaikan lapangan diakibatkan oleh peningkatan kontribusi radiasi hambur pada sumbu utam.
- ⊙ Untuk z , A , dan $h\nu$ konstan *PDD* meningkat dengan kenaikan f karena penurunan efek z pada invers square law untuk radiasi primer.
- ⊙ Untuk z , A , dan f konstan *PDD* setelah z_{\max} meningkat dengan kenaikan energi berkas karena penurunan dalam μ_{eff} .

2.7 Dosis buildup

Jarak antara permukaan sampai dengan titik dengan dosis maksimum disebut kedalaman maksimum atau kedalaman *build up*. Dalam proses interaksi

radiasi dengan materi, sebagian atau seluruh energi sinar-x ditransfer ke elektron. Selanjutnya energi didistribusikan dalam medium terutama oleh elektron sekunder yang bergerak dan dibebaskan akibat radiasi primer. Distribusi dosis terutama tergantung pada jangkauan elektron sekunder tersebut. Untuk sinar-x dengan energi rendah, seperti sinar-x superfisial, menyebabkan elektron sekunder bergerak menuju permukaan, kemudian bergerak ke segala arah, namun energinya cepat terserap. Di bawah kulit, sinar primer berkurang karena daya tembus radiasi datang yang rendah. Sebagai akibatnya dosis maksimum terjadi pada permukaan medium ^[21].

2.8 Rasio pada sumbu utama dan profil berkas.

Dosis distribusi sepanjang sumbu pusat berkas hanya memberikan sebagian dari informasi yang diperlukan untuk deskripsi dosis yang akurat pada tubuh pasien. Dalam bentuk paling sederhana, data sumbu utama profil berkas sinar diukur tegak lurus dari sumbu berkas sinar pada kedalaman yang diberikan dalam fantom. Kedalaman pengukuran biasanya di d_{max} dan pada kedalaman 10 cm untuk verifikasi sesuai dengan spesifikasi alat. Untuk mengetahui profil dosis, dilakukan pengukuran pada berbagai kedalaman pada fantom air.

Profil berkas megavoltage sinar-x terdiri dari 3 (tiga) wilayah yang berbeda yaitu : daerah pusat (tengah), merupakan bagian dari profil yang memanjang dari poros tengah sinar ke dalam 1-1,5 cm dari tepi bidang geometris berkas sinar. Untuk linac, wilayah tengah dari berkas profil dipengaruhi oleh energi yang berasal dari elektron ketika menumbuk target. Daerah Penumbra yaitu berkas sinar yang jatuh di sekitar tepi bidang berkas geometris dan meluas sampai batas bawah kolimator, penumbra tergantung pada energi berkas, ukuran sumber, SSD, jarak sumber ke kolimator dan kedalaman dalam sebuah fantom. Daerah Umbra adalah berkas sinar yang jatuh di luar bidang radiasi, jauh dari tepi lapangan, dosis di wilayah ini umumnya rendah ^[21].

2.9 Kerataan berkas (*beam flatness*)

Profil dosis berkas sinar-x megavolt mengandung dua daerah yang berbeda. Daerah inter umbra (A), berkas tidak dipengaruhi oleh kolimator, dan

daerah penumbra (B) yang dipengaruhi oleh lapangan yang ditentukan oleh kolimator. Batas antara A dan B tidak jelas, dan secara nominal berada pada 1 cm sampai 1.5 cm dari pinggir lapangan. *Beam flatness* (F) didefinisikan dengan menentukan terlebih dahulu nilai D_{max} dan D_{min} yang terletak pada daerah sentral 80% lebar berkas. Nilai F ditentukan mengikuti persamaan berikut:

$$\%F = 100 \times \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

Spesifikasi kerataan untuk linac umumnya diukur dalam medium air pada kedalaman 10 cm, SSD 100 cm, lapangan maksimum yang tersedia (biasanya 40 x 40 cm), selanjutnya disyaratkan $F < 3\%$. Penentuan kerataan pada kedalaman 10 cm disebabkan pada z_{max} adanya efek '*over-flattening*' yang terjadi pada profil dosis dan pada kedalaman lebih dari 10 cm menjadi '*under-flattening*'. Umumnya, nilai F pada z_{max} dengan lapangan 40 x 40 cm dan SSD 100 cm tidak boleh melebihi 5% [21].

2.10 Simetri berkas

Simetri berkas (S) umumnya ditentukan pada z_{max} yang merepresentasikan parameter uniformitas. Nilai S untuk 2 titik yang berjarak sama dari pusat berkas tidak boleh melebihi 2%. Alternatif lain, S ditentukan dahulu luas profil berkas pada setiap sisi (kanan dan kiri) terhadap sumbu utama sampai pada 50% (terhadap 100% pada titik di sumbu utama), dan selanjutnya S mengikuti persamaan berikut:

$$\%S = 100 \times \frac{\text{luas daerah}_{\text{kiri}} - \text{luas daerah}_{\text{kanan}}}{\text{luas daerah}_{\text{kiri}} + \text{luas daerah}_{\text{kanan}}}$$

Umumnya nilai simetri dapat dihitung dengan program komputer yang tersedia pada dosimeter relatif [21].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

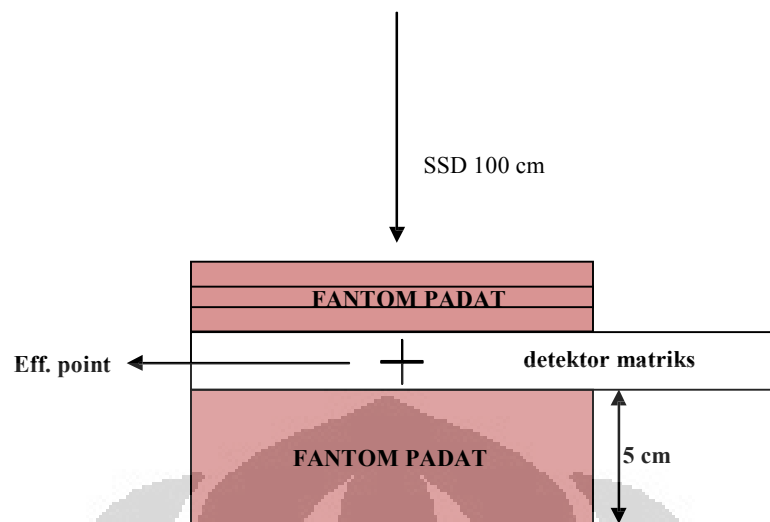
3.1. Peralatan

Dalam penelitian ini proses pengambilan data dilakukan di Bagian Radioterapi RSPAD Gatot Soebroto Jakarta, dengan menggunakan Linear Accelerator (Linac) Merk Elekta dengan nomer serial 1350, tipe Precise Treatment System. Linac memproduksi berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV serta berkas elektron 4, 6, 8, 10, 12, dan 15 MeV.

Untuk memperoleh profil dosis, dilakukan pengukuran menggunakan detektor matriks produksi PTW dengan ukuran 22 mm x 300 mm x 420 mm. Matriks mempunyai 729 detektor bilik ionisasi (27 x 27), ukuran detektor 5 mm x 5 mm x 5 mm, dengan jarak antar detektor 10 mm, detektor terletak pada kedalaman 5 mm dari permukaan matriks. Sebagai medium pengukuran digunakan fantom padat (RW3) ukuran 30 x 30 cm² dengan berbagai variasi ketebalan yaitu 1 mm, 2 mm, 5 mm dan 10 mm. Selain dengan detektor matriks pengukuran profil dosis dilakukan dengan dosimeter relatif PTW dan fantom air ukuran 636 mm x 634 mm x 523 mm. Untuk memperoleh data pengukuran digunakan 2 buah bilik ionisasi volume 0,125 cm³ tipe 30013 dan 30014. Data hasil pengukuran dapat langsung dilihat dan dianalisa dengan menggunakan program *Mephysto* dan *Multicheck*.

3.2. Metode Penelitian.

Pengukuran *PDD* dan profil dosis untuk berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV dengan detektor matriks dilakukan dalam medium fantom padat dengan kondisi SSD 100 cm dan lapangan 10 x 10 cm². Skema cara pengukuran dapat dilihat dalam Gambar 3.1. Penambahan fantom padat setebal 5 cm di bawah detektor matriks dimaksudkan sebagai medium penghambur balik, pengukuran dilakukan mulai dari kedalaman 5 mm sampai dengan 300 mm dengan dosis 1 Gray (100 MU) pada kedalaman maksimum, untuk koleksi data pengukuran *PDD* diambil dengan interval 2 mm. Data sepanjang sumbu utama dinormalisasikan terhadap nilai maksimum untuk memperoleh *PDD*.



Gambar 3.1. Skema pengukuran untuk berkas sinar-x menggunakan detektor matriks

Untuk pengukuran profil dosis berkas elektron, terlebih dahulu dilakukan pengukuran *PDD* dengan fantom air untuk memperoleh nilai kedalaman maksimum. Kondisi pengukuran berkas elektron pada *SSD* 95 cm, dengan menggunakan aplikator $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Pengukuran diadakan untuk semua energi nominal berkas elektron 4, 6, 8, 10, 12 dan 15 MeV. Metoda pengukuran berkas elektron sama dengan pengukuran *PDD* dan profil dosis berkas sinar-x. Mengingat *PDD* dan profil elektron dipengaruhi oleh energinya maka pemilihan kedalaman pengukuran dibuat bervariasi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

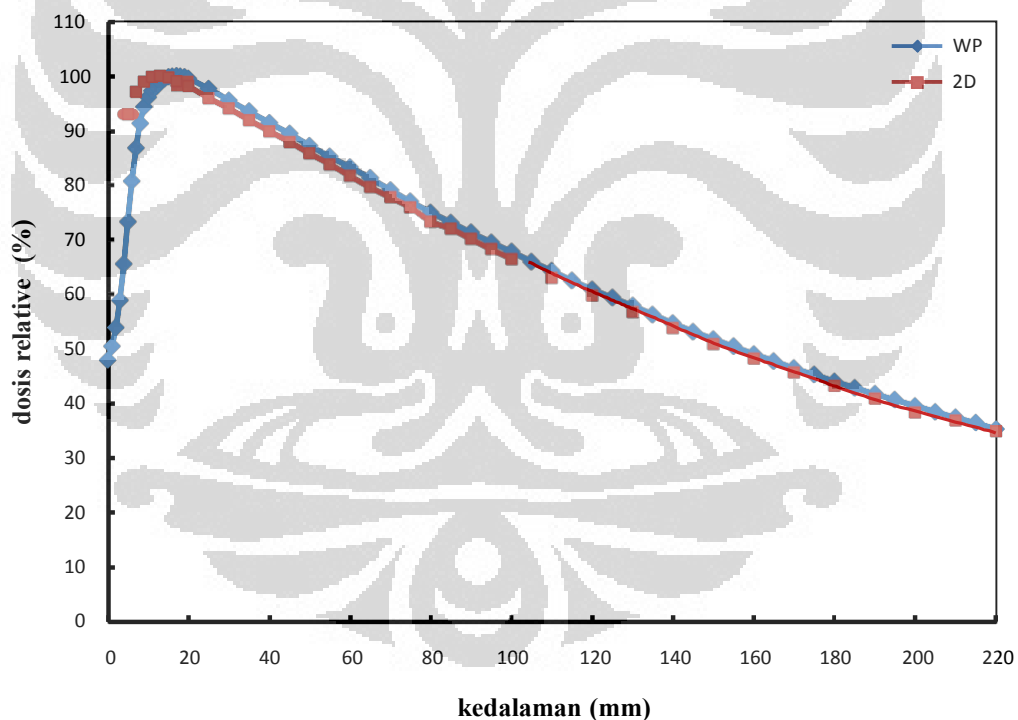
Tabel 3.1 Variasi kedalaman pengukuran pada sumbu utama berkas elektron dengan detektor matriks.

Energi Elektron (MeV)	Rentang kedalaman pengukuran (mm)	Kedalaman pengukuran profil dosis (mm)
4	5 - 19	5, 15
6	5 - 27	5, 15
8	5 - 35	5, 15, 25, 35
10	5 - 45	5, 15, 25, 35
12	5 - 53	5, 15, 25, 35
15	5 - 69	5, 15, 25, 35

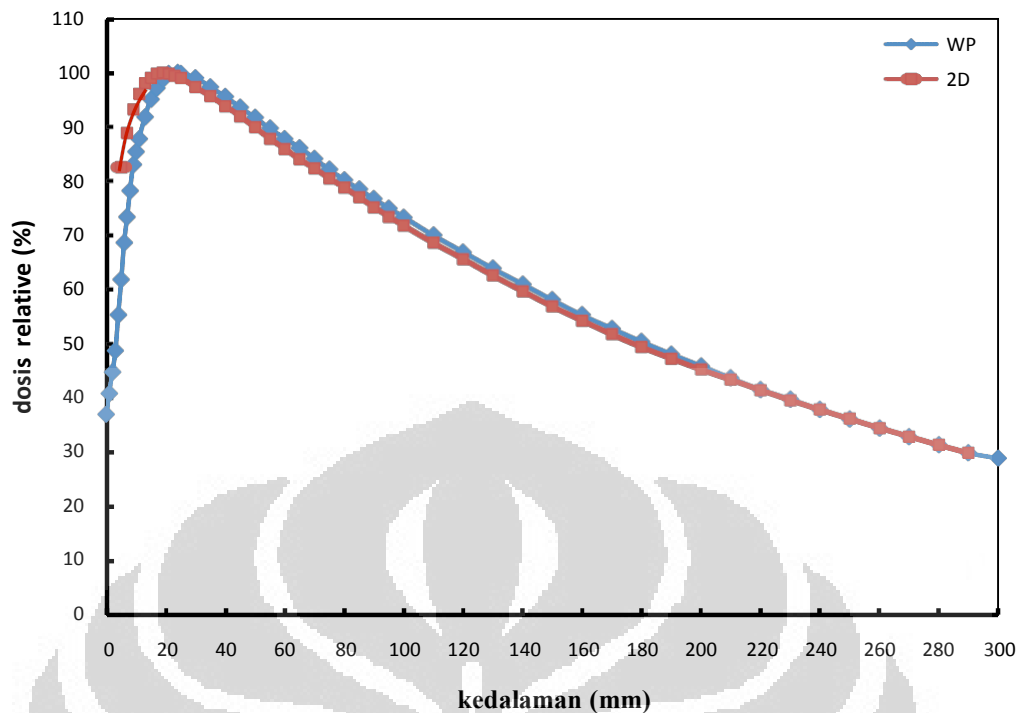
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil pengukuran *PDD* berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV

Seluruh hasil pengukuran *PDD* menggunakan detektor matriks untuk berkas sinar-x dapat dilihat pada Lampiran 1, sedangkan data hasil pengukuran menggunakan fantom air disajikan pada Lampiran 2. Pada gambar dibawah ditampilkan *PDD* berkas sinar-x 6 MV hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air. Data nilai *PDD* yang diperoleh sudah dinormalisasikan terhadap *PDD* kedalaman maksimum (d_{max}), dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1. Dengan cara yang sama dilakukan untuk memperoleh *PDD* sinar-x 10 MV dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Perbandingan *PDD* Berkas Sinar-x 6 MV untuk kondisi SSD 100 cm dengan luas lapangan 10 x 10 cm² antara Detektor Matriks (2D) dan Fantom air (WP)



Gambar 4.2 Perbandingan PDD Berkas Sinar-x 10 MV untuk kondisi SSD 100 cm dengan luas lapangan 10 x 10 cm² antara Detektor Matriks (2D) dan Fantom air (WP).

Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan grafik *PDD* berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air saling berhimpitan utamanya setelah melewati kedalaman maksimum (d_{max}). Untuk keperluan evaluasi selanjutnya juga diperoleh nilai *PDD* pada kedalaman 10 cm (d_{10}) untuk kedua metoda pengukuran, yang dapat dilihat dalam tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai *PDD* pada kedalaman maksimum (d_{max}) dan nilai pada kedalaman 100 mm (d_{100}) berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV antara detektor matriks dan fantom air pada kondisi SSD 100 cm dengan lapangan 10x10 cm²

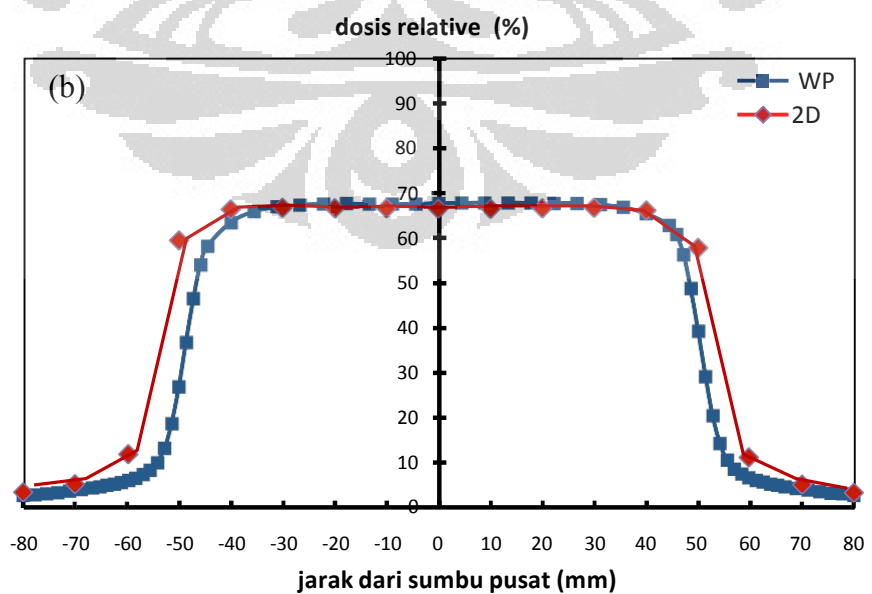
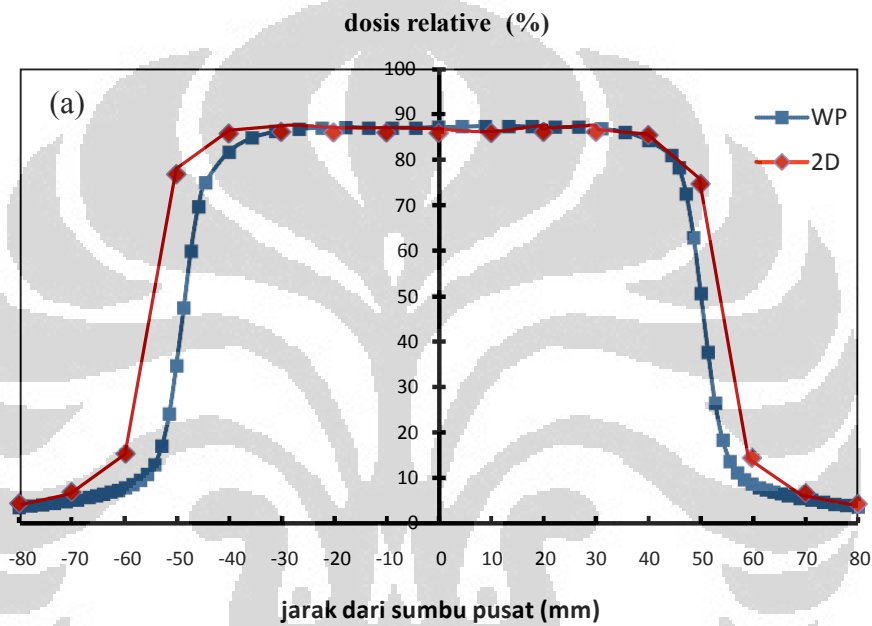
Berkas Sinar-x	Kedalaman	Fantom Air	Detektor Matriks	Δ	Nilai Acuan*
6 MV	d_{max}	17 mm	13 mm	4 mm	
	d_{100}	67,8 %	66,5 %	1,3 %	67,5 %
10 MV	d_{max}	24 mm	19 mm	5 mm	
	d_{100}	73,3 %	71,8 %	1,5 %	73 %

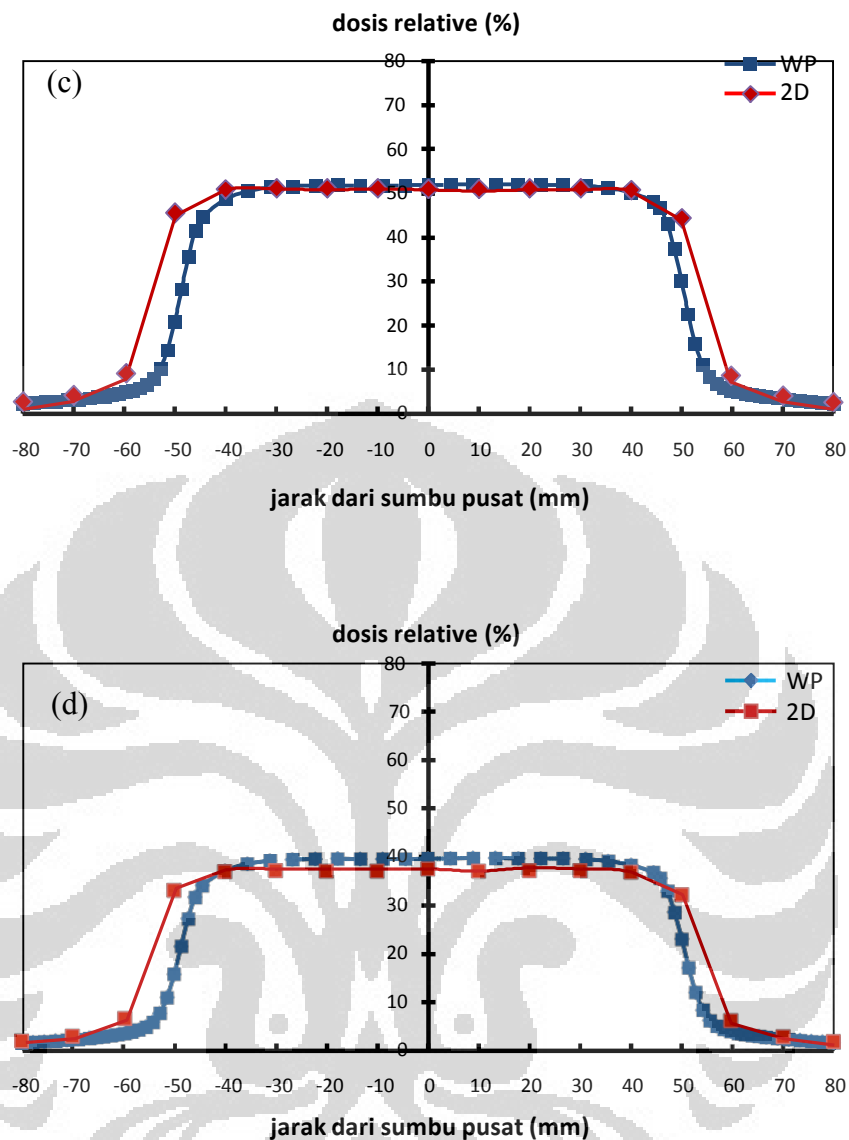
*Manual linac elekta precise system [5]

Nilai *PDD* pada kedalaman d_{10} hasil pengukuran kedua metoda masih dalam rentang yang diperbolehkan.

4.2 Hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV

Pengukuran profil dosis sinar-x dilakukan dengan berbagai variasi kedalaman, semua hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV dapat dilihat pada Lampiran 3 dan Lampiran 4. Gambar dibawah ditampilkan profil dosis sinar-x 6 MV dalam variasi kedalaman hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air.





Gambar 4.3 Profil dosis berkas sinar-x 6 MV, SSD 100 cm, luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ antara detektor matriks (2D) dan fantom air (WP) pada kedalaman (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm dan (d) 20 cm.

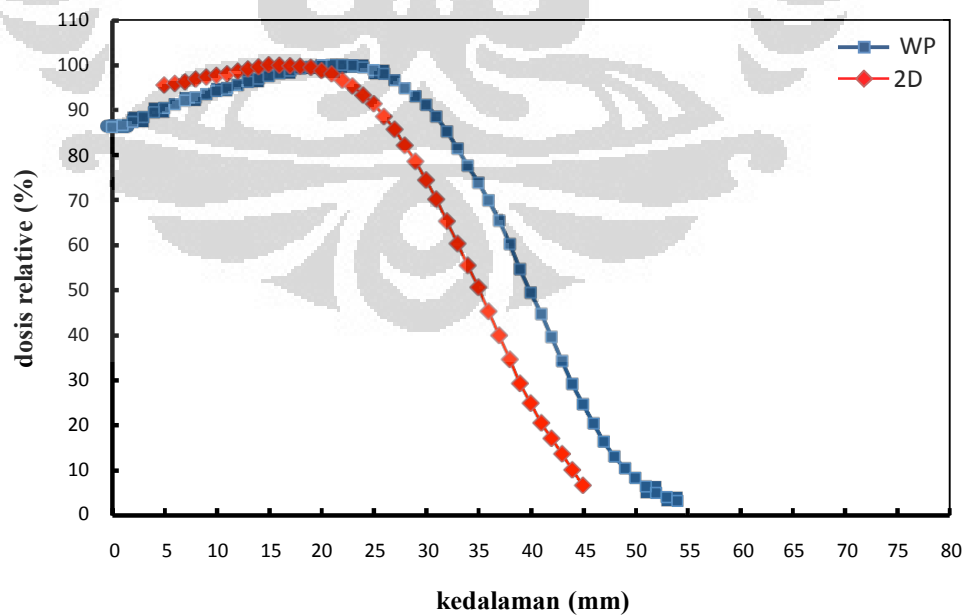
Tampak kesesuaian profil dosis antara daerah tengah lapangan hasil pengukuran dengan detektor matriks, dengan yang dihasilkan oleh fantom air terutama daerah tengah lapangan dengan koordinat -40 mm sampai dengan 40 mm. Perbedaan yang signifikan terjadi pada daerah sekitar 1 cm dari tepi lapangan. Dari gambar profil dosis diatas diperoleh perbedaan *PDD* di berbagai kedalaman dengan menggunakan kedua metoda pengukuran, ditampilkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbedaan *PDD* sinar-x pada berbagai kedalaman hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air

Sinar-x (MV)	Kedalaman (cm)	PDD		Δ (%)
		WP	2D	
6	5	87,2	85,8	1,4
	10	67,8	66,5	1,3
	15	51,8	50,9	0,9
	20	39,6	38,4	1,2
10	5	91,7	89,9	1,8
	10	73,3	71,8	1,5
	15	58,1	56,9	1,2
	20	45,9	45,3	0,6

4.3 Hasil pengukuran *PDD* berkas elektron 4 MeV - 15 MeV

Hasil pengukuran *PDD* berkas elektron 4 MeV - 15 MeV dengan detektor matriks dan fantom air dapat dilihat pada Lampiran 5 dan Lampiran 6. Sebagai contoh ditampilkan *PDD* berkas elektron 10 MeV hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air. Data nilai *PDD* yang diperoleh sudah dinormalisasikan terhadap *PDD* kedalaman maksimum (d_{max}), dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Perbandingan *PDD* berkas elektron 10 MeV, SSD 95 cm, aplikator 10 x 10, antara detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

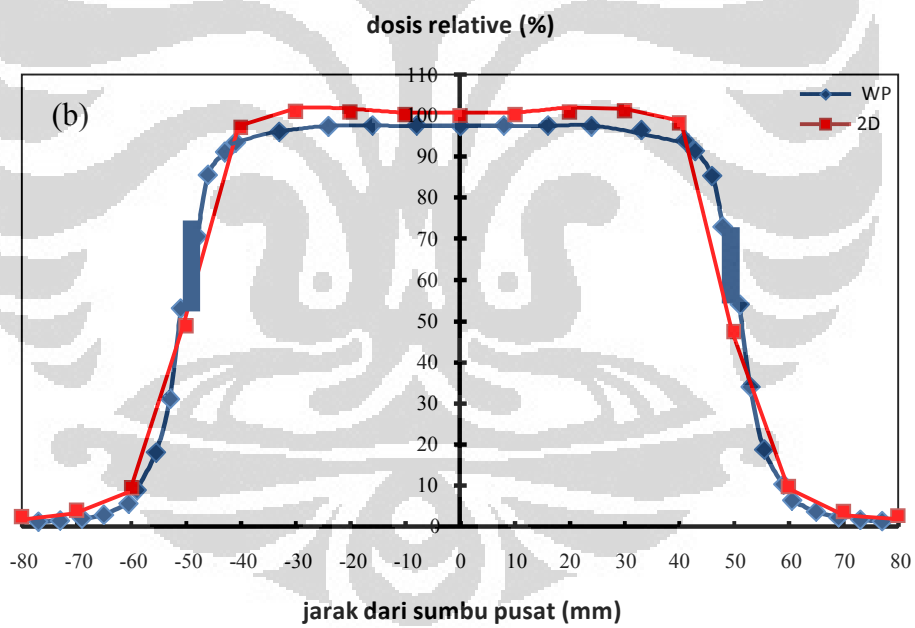
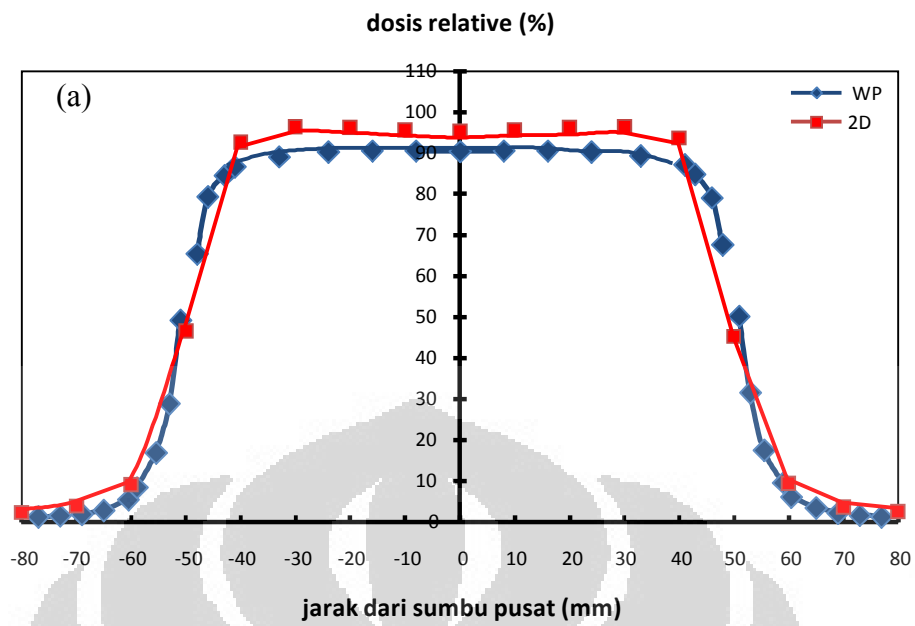
Pada umumnya hasil pengukuran *PDD* dengan detektor matriks lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan fantom air. Kedalaman maksimum hasil pengukuran detektor matriks bergeser secara signifikan ke arah permukaan sekitar 3 mm – 6 mm. Untuk keperluan evaluasi ditampilkan kedalaman maksimum dan nilai R_{50} hasil kedua metoda pengukuran untuk semua energi elektron 4 MeV sampai dengan 15 MeV menggunakan aplikator 10 x 10 cm² dan kondisi SSD 95 cm dalam Tabel 4.3

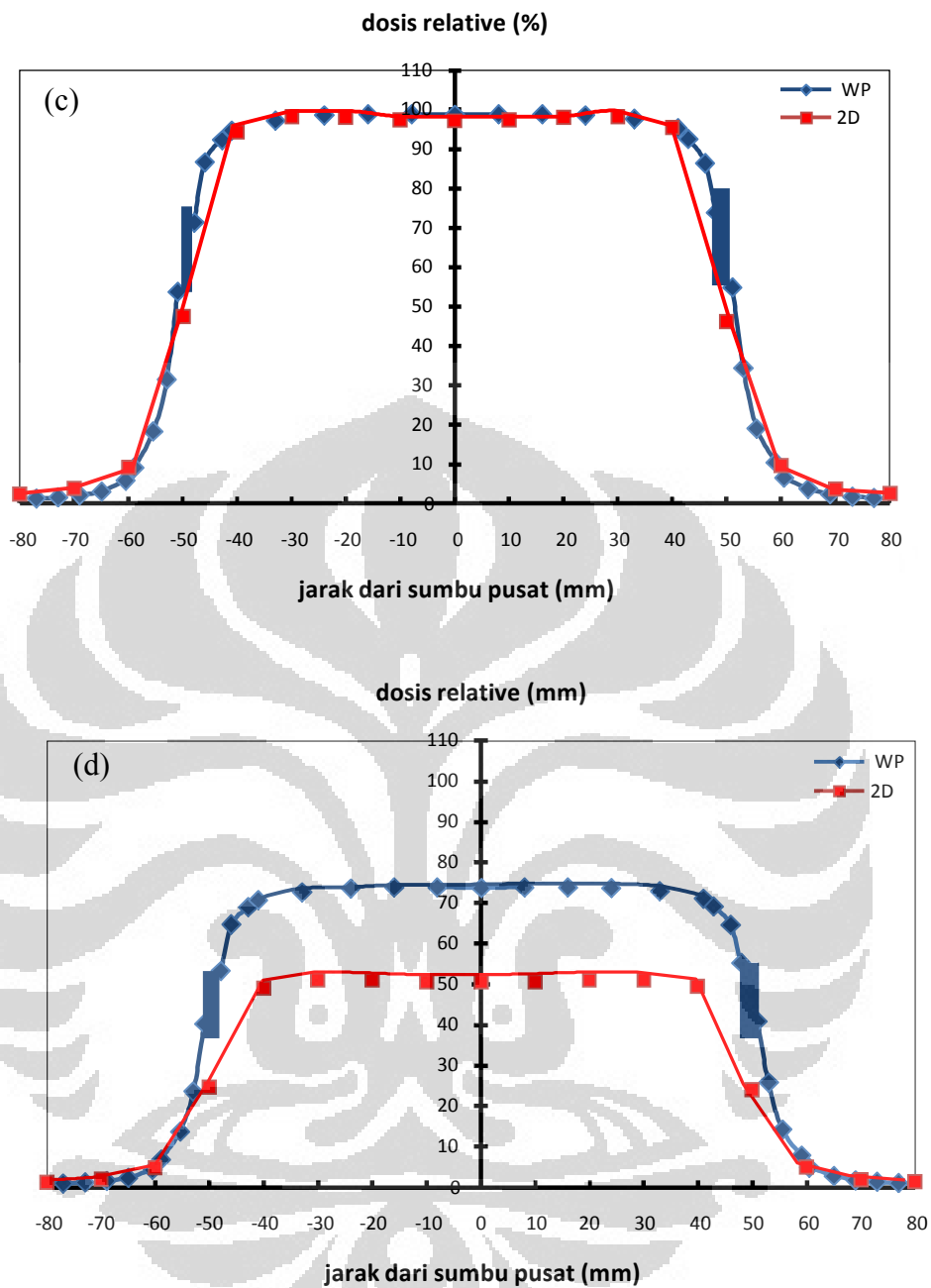
Tabel 4.3 Nilai *PDD* pada kedalaman maksimum (d_{max}) dan R_{50} berkas elektron 4 MeV - 15 MeV SSD 95 cm, aplikator 10 x10 antara detektor matriks dan fantom air

Berkas Elektron (MeV)	d_{max}			R_{50}		
	Fantom Air (mm)	Detektor Matriks (mm)	Δ (mm)	Fantom Air (mm)	Detektor Matriks (mm)	Δ (mm)
4	8	5	3	16	12	4
6	13	9	4	25	20	5
8	17	11	6	33	28	5
10	21	15	6	40	35	5
12	25	21	4	48	42	6
15	28	23	5	60	54	4

4.4 Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 4 MeV - 15 MeV

Semua hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 4 MeV - 15 MeV dapat dilihat pada Lampiran 7 dan Lampiran 8. Pada Gambar 4.6 ditampilkan profil dosis berkas elektron 10 MeV pada berbagai variasi kedalaman





Gambar 4.5 Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 10 MeV, SSD 95 cm, aplikator 10 x 10 antara detektor matriks (2D) dan fantom air (WP) pada kedalaman (a) 5 mm, (b) 15 mm, (c) 25 mm dan (d) 35 mm.

Pada umumnya kedua profil dosis di daerah tengah lapangan mendekati sejajar. Tampak nilai pada sumbu utama profil dosis hasil pengukuran dengan detektor matriks pada mulanya relatif lebih tinggi 5%, 2,5%, 1,6%, pada kedalaman 5 mm, 15 mm, dan 25 mm kemudian relatif lebih rendah 23,3 % pada

kedalaman 35 mm. Perbedaan kedua profil untuk berbagai kedalaman dan energi elektron dapat dilihat dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbedaan PDD elektron pada berbagai kedalaman hasil pengukuran dengan detektor matriks dan fantom air

Energi (MeV)	Kedalaman (cm)	PDD		$\Delta\%$
		WP	2D	
4	0,5	93	100	7
	1,5	61	26	-35
6	0,5	91	97,3	6,3
	1,5	98,4	83,5	-14,9
8	0,5	90,8	94,4	3,6
	1,5	99,6	99,4	-0,2
	2,5	87,8	67,4	-20,4
10	3,5	37,3	6,7	-30,6
	0,5	90,4	95,4	5
	1,5	97,5	100	2,5
	2,5	98,8	97,2	-1,6
12	3,5	73,8	50,5	-23,3
	0,5	91,9	96,3	4,4
	1,5	97,2	98,9	1,7
	2,5	100	99,1	-0,9
15	3,5	92,7	76,5	-16,2
	0,5	94,2	95	0,8
	1,5	98,4	98,8	0,4
	2,5	99,9	98,6	-1,3
	3,5	98,9	92,8	-6,1

4.5 Pembahasan

Salah satu faktor penentu keberhasilan radioterapi menggunakan linac adalah ketelitian dan akurasi pemberian dosis pada target dan perlindungan efek radiasi pada berbagai organ sekitarnya. Verifikasi perencanaan pemberian dosis preskripsi merupakan salah satu metoda yang mendukung ketelitian perlakuan radioterapi. Bertambahnya kompleksitas teknik perlakuan penyinaran semakin bertambah kompleks pula teknik verifikasi.

Pada saat ini Radioterapi RSPAD melakukan perencanaan 3 Dimensi (3D CRT) tentunya verifikasi yang harus dilakukan belum terlalu kompleks apabila dibandingkan perlakuan radioterapi dengan teknologi baru *IMRT*, *IGRT* dan *VMAT*. Salah satu detektor yang dapat digunakan untuk verifikasi perencanaan

adalah detektor matriks PTW dengan jumlah detektor 729 (27 x 27). Dalam penelitian ini telah diukur *PDD* dan profil dosis sinar-x dan elektron keluaran linac *Elekta Precise System* serial 1350 yang hasilnya akan dibandingkan dengan hasil pengukuran fantom air.

Verifikasi perlakuan radioterapi dengan detektor matriks telah dilakukan oleh banyak peneliti diantaranya oleh Spezi E, *et al.*^[27], Letourneau D, *et al.*^[16] dan Qi Lin li *et al.*^[24] yang melakukan verifikasi perencanaan menggunakan 2D Array untuk radioterapi khususnya IMRT dan IGRT. Pada detektor matriks letak detektor berada pada 0,5 cm dari permukaan, sehingga pengukuran *PDD* tidak dapat dimulai dari kedalaman yang mendekati titik 0 (nol), seperti pada pengukuran dengan fantom air. Pada umumnya *PDD* hasil pengukuran dengan detektor matriks (sinar-x dan foton) mempunyai kedalaman maksimum yang lebih dangkal dibandingkan dengan *PDD* hasil pengukuran fantom air, hal ini disebabkan karena adanya perbedaan densitas materi pengukuran. Pengukuran dengan detektor matriks menggunakan medium fantom padat (RW3) yang mempunyai densitas 1.045 gr/cm³^[23] dibandingkan dengan air yang mempunyai densitas 1 gr/cm³, maka fantom padat mempunyai densitas yang sedikit lebih tinggi dibandingkan air, dengan densitas yang lebih besar maka interaksi elektron pada atom di fantom padat lebih banyak terjadi yang mengakibatkan lebih cepat tercapai keseimbangan partikel, sehingga kurva *PDD* yang dihasilkan dengan detektor matriks mempunyai titik kedalaman maksimum yang lebih dangkal dibandingkan pengukuran dengan fantom air. Pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.3 diperlihatkan adanya perbedaan nilai kedalaman maksimum pada berkas sinar-x dan elektron untuk kedua metoda pengukuran, tetapi pada pengukuran berkas sinar-x di kedalaman 10 cm (d_{100}), maka kedua metoda pengukuran mempunyai perbedaan kurang dari 2 % untuk sinar-x 6 MV dan 10 MV dibandingkan dengan nilai acuan dari *Elekta Precise Treatment System* maka kedua metoda tersebut berbeda kurang dari 1,5 %. Sedangkan nilai R_{50} untuk pengukuran berkas elektron pada kedua metoda menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan rentang 4 mm – 6 mm dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Pengambilan data untuk pengukuran profil dosis dengan detektor matriks relatif lebih sedikit karena jarak antar detektor 1 cm, tidak seperti pengambilan

data pengukuran dengan fantom air yang mempunyai interval 1 mm. Semua profil dosis sinar-x hasil kedua metoda pengukuran pada kedalaman 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm tidak berbeda secara signifikan terutama didaerah lapangan radiasi, hasil yang demikian juga dinyatakan oleh *Spazi E et al* [27]. Perbedaan terlihat pada daerah penumbra yang tidak berpengaruh pada verifikasi perencanaan penyinaran dosis target tumor. Dari kurva profil dosis diamati pula persentase dosis pada titik pusat lapangan yang berarti sama dengan nilai *PDD*, berdasarkan nilai *PDD* dari keempat kedalaman hasil penelitian mendukung temuan sebelumnya, kedua metoda tersebut memberikan perbedaan kurang dari 2 %.

Pada berkas elektron, pengukuran dengan detektor matriks berbeda dengan bilik ionisasi. Nilai *PDD* untuk semua energi hasil pengukuran dengan detektor matriks relatif lebih rendah dari hasil pengukuran dengan fantom air. Demikian pula kedalaman maksimum (d_{max}) bergeser kearah permukaan 3 mm untuk energi 4 MeV dan rata rata 5 mm untuk energi 6 MeV – 15 MeV. Perbedaan profil dosis elektron hasil kedua metoda pengukuran pada umumnya berubah dengan kenaikan kedalaman, pada kedalaman 0,5 cm pada umumnya profil dosis hasil pengukuran matriks relatif lebih tinggi. Pada mulanya perbedaan menurun dengan kenaikan kedalaman sampai kedua profil hampir berhimpitan yang berarti kedua profil tidak berbeda signifikan. Selanjutnya perbedaan profil meningkat tajam dengan arah berlawanan terhadap kenaikan kedalaman.

Bilik ionisasi pada detektor matriks didesain untuk sinar-x megavolt, sehingga dinding bilik dibuat relatif lebih tebal dibandingkan dengan bilik ionisasi yang didesain untuk elektron. Pada kedalaman yang rendah kemungkinan di dalam bilik tidak terjadi keseimbangan elektronik. Fluence elektron masuk lebih tinggi dari fluence elektron yang keluar, tanggapan bilik menjadi relatif lebih tinggi. Dengan kenaikan kedalaman, energi elektron menurun dan pada kedalaman tertentu di dalam bilik ionisasi mendekati keseimbangan elektronik. Dengan bertambahnya kedalaman, energi elektron menurun dan dalam bilik tidak terjadi keseimbangan elektronik pada saat pengukuran yang direpresentasikan tanggapan bilik relatif rendah. Dengan fenomena ini dapat disimpulkan bahwa detektor matriks kurang baik apabila digunakan untuk pengukuran berkas elektron.

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat diambil beberapa kesimpulan :

1. Detektor matriks cocok untuk pengukuran dosis didaerah lapangan penyinaran, tetapi tidak pada penumbra. Detektor matriks cocok untuk verifikasi perencanaan pemberian dosis pada target tumor, namun tidak cocok untuk mengetahui dosis disekitar target penyinaran (*OAR*).
2. Hasil pengukuran *PDD* menggunakan detektor matriks mempunyai kedalaman maksimum yang lebih pendek dibandingkan hasil pengukuran dengan fantom air, perbedaan antara kedua metoda tersebut yaitu 4 mm – 5 mm untuk sinar-x dan 3 mm – 6 mm untuk berkas elektron. Kesesuaian hasil pengukuran detektor matriks dengan bilik ionisasi dalam fantom air direpresentasikan oleh nilai *PDD* yang berbeda kurang dari 2 %.
3. Berkas elektron energi 4 dan 6 MeV pada kedalaman 1,5 cm mempunyai perbedaan yang signifikan yaitu 14,9 % - 35 % dan elektron 8 – 15 MeV pada kedalaman 3,5 cm dengan rentang 6,1% – 30,6 %. Dari data tersebut detektor matriks mempunyai tanggapan yang bervariasi perubahan kedalaman dan energi berkas. Oleh karenanya detektor ini tidak cocok digunakan untuk pengukuran berkas elektron.

Saran

Untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat dalam mempelajari karakteristik detektor matriks, penelitian ini dapat di tambahkan parameter lainnya.

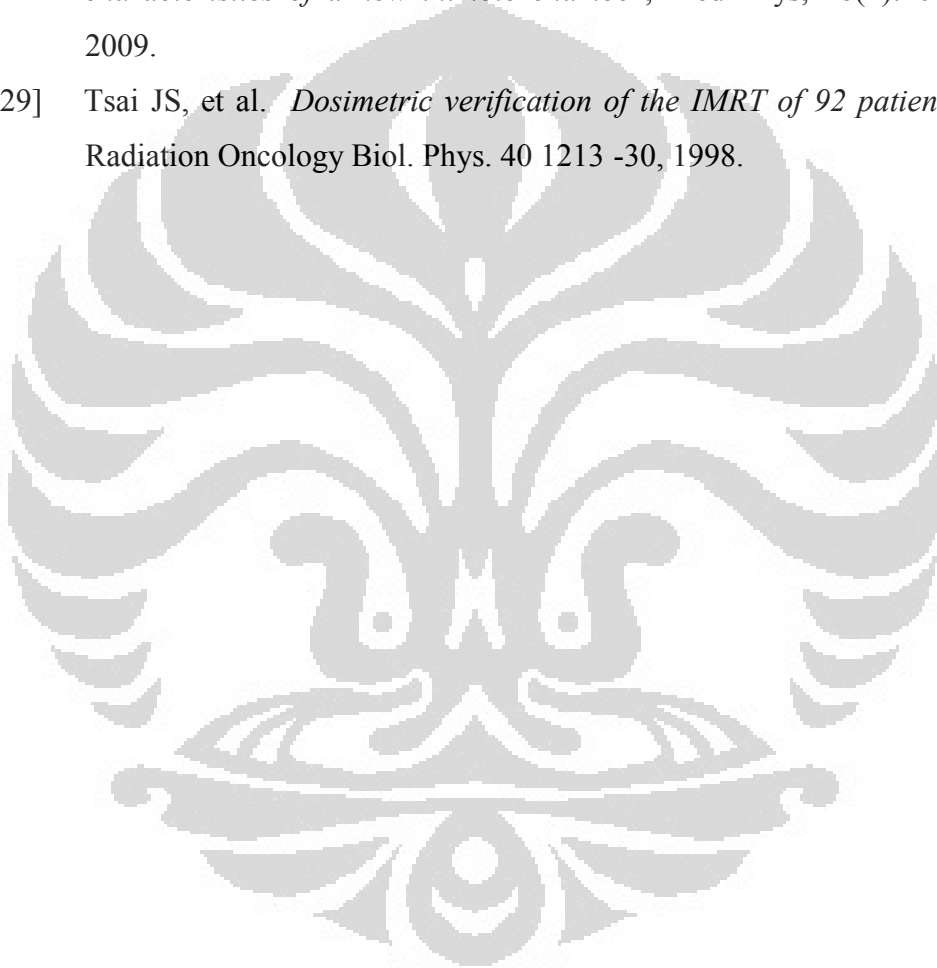
Daftar Pustaka

26

- [1] Amerio S et al. *Dosimetric characterization of a large area pixel-segmented ionization chamber*, Med. Phys. 31 414-20, 2004.
- [2] Attix F.H. “*Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*”, University of Wisconsin Medical School, Madison, Wisconsin. 1986.
- [3] Buonamici FB, Compagnucci A, Marazzo L, Russo S, Bucciolini M, *An Intercomparison between film dosimetry and diode matrix for IMRT quality assurance*, Med Phys. 34 (4) : 1372-79, 2007.
- [4] Chamber H, *Introduction to Health Physics (2nd edition)*, Pergamon Press, New York 1987.
- [5] Elekta, *Manual Precise Treatment System* RSPAD Gatot Soebroto, Jakarta 2005.
- [6] Frass B, Doppke K, Hunt M, Kutcher G, Starkschall G, Stern R and Van Dyke J, *American Association of Physicists in Medicine Radiation Committee Task Group 55: quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning* Med. Phys. 10 1773-829, 1998.
- [7] Hall. Eric J, “*Radiobiology for the Radiologist*”, 4th ed. J.B. Lippincott Company, Philadelphia.
- [8] Herzen J, Todorovic M, Cermens F, et al. *Dosimetric evaluation of a 2D pixel ionization chamber for implementation in clinical routine*. Phys Med Biol. 52(4): 1197-1208, 2007.
- [9] IAEA TRS No. 398, *Absorbed dose determination in external beam radiotherapy*, International Atomic Energy Agency, 2000.
- [10] ICRU Report 62, *Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy (Supplement to ICRU Reports 50)*, The International Commission on Radiation Units and Measurements, 1999.
- [11] Jack Y, Kon R, *IMRT verification with mapcheck*, AAPM conference, Seattle, USA 2005.

- [12] Johns. H.E. Cunningham, John. R, “*The physics of Radiology*”, Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA 1983.
- [13] Jursinic P A, Nelms B E, *A 2D Array and analysis software for verification of IMRT*, Med. Phys. 30 870-9, 2003.
- [14] Khan F.M. “*The Physics of Radiation Therapy*” Lippincott Williams and Baltimore, 2003.
- [15] Kron Thomas et al “ *The Physics of Radiotherapy X Ray and Electron*”, Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin 1997.
- [16] Letourneau D, Gulam M, Yan Di, Oldham M, Wong JW, *Evaluation of 2D Array for IMRT quality assurance*, Radiation Oncology. 70. 199206, 2004.
- [17] Matrixx user manual, 12, Schwarzenbruck, Germany : *Scanditronix Wellhofer*; 2006.
- [18] Mayles P, Nahum A, Rosenwald JC, “*Handbook of Radiotherapy Physics, Theory and Practice*”, Taylor and Francis, London 2007.
- [19] Michael J, Albert VDG, “*Basic Clinical Radiobiology*” fourth edition, Hodder Arnold an Hachette UK Company, 2009.
- [20] Murat B, Gokhan O, Cuneyt E, *Basic Radiation Oncology*, Springer Berlin 2010.
- [21] Podgorsak E.B, “*Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Student*, IAEA Vienna, 2005.
- [22] PTW, *2D Array Seven29 user manual*, Freiburg, Germany 2008.
- [23] PTW, *ionization chamber book*, Freiburg, Germany, 2011.
- [24] Qi-Lin li, Xiao-Wu Deng, Li-Xin Chen, Xiao-Yan Huang, Shao-Min Huang, *The angular dependence of a 2D diode array and the feasibility of its application in verifying the composite dose distribution of IMRT*, Chinese Journal of cancer, 2010.
- [25] Sathiyam S, Ravikumar M, Varatharaj C, Sanjay S S, *Dosimetric study of 2D ion chamber array matrix for the modern radiotherapy treatment verification*, 2010.

- [26] SC Lillicrap, GR Higson, dan AJ Connor, *Radiotherapy equipment standards from the International Electrotechnical Commission*, The British Journal of Radiology, 71. 1225-1228, 1998.
- [27] Spezi E, Angelini AL, Ferri A. *A Multiple Acquisition Sequence for IMRT Verification with a 2D Ion Chamber Array*, Medical Dosimetry 2006 31(4):269-272
- [28] Sun W Z, Chen L X, Sun H Q, et al. *The investigation of the characteristics of a new thimble chamber*, Med Phys, 26(2):1063-1066, 2009.
- [29] Tsai JS, et al. *Dosimetric verification of the IMRT of 92 patients*, Int J. Radiation Oncology Biol. Phys. 40 1213 -30, 1998.



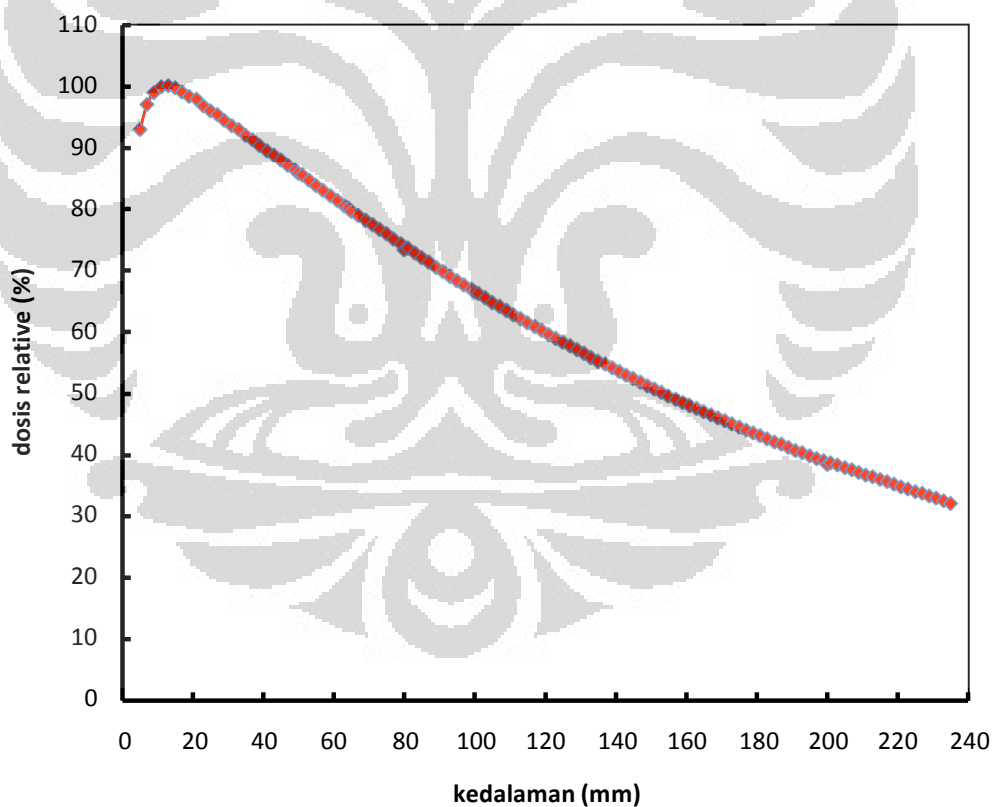
LAMPIRAN 1

Hasil Pengukuran PDD Sinar-X 6 MV dengan Detektor Matriks

Kedalaman (mm)	Dosis Maksimum (Gy)	Dosis pada Sumbu Utama	Normalisasi
5	0,934	0,917	92,9
7	0,976	0,957	97
9	0,996	0,976	98,9
11	1,005	0,985	99,8
13	1,006	0,987	100
15	1,003	0,984	99,7
17	0,995	0,977	99
19	0,987	0,970	98,3
21	0,982	0,965	97,8
23	0,970	0,954	96,7
25	0,962	0,947	95,9
27	0,956	0,941	95,3
29	0,947	0,932	94,4
31	0,937	0,923	93,5
33	0,928	0,917	92,9
35	0,920	0,907	91,9
37	0,911	0,900	91,2
39	0,902	0,891	90,3
41	0,892	0,882	89,4
43	0,884	0,875	88,7
45	0,878	0,868	87,9
47	0,869	0,860	87,1
49	0,860	0,852	86,3
50	0,856	0,848	85,8
51	0,851	0,843	85,5
53	0,842	0,835	84,6
55	0,833	0,827	83,8
57	0,825	0,819	83
59	0,816	0,811	82,1
61	0,808	0,802	81,3
63	0,799	0,794	80,5
64	0,795	0,790	80,1
65	0,791	0,786	79,6
67	0,783	0,779	78,9
69	0,775	0,771	78,1
71	0,766	0,764	77,4
73	0,758	0,756	76,6
75	0,750	0,749	75,9
77	0,743	0,741	75,1
79	0,735	0,734	74,3
80	0,732	0,730	73,3
81	0,728	0,726	73,6
83	0,720	0,719	72,8
85	0,713	0,711	72
87	0,705	0,704	71,3
89	0,698	0,696	70,5
91	0,690	0,689	69,8

93	0,683	0,681	69
95	0,675	0,674	68,3
97	0,668	0,667	67,6
99	0,661	0,660	66,9
100	0,658	0,657	66,5
101	0,654	0,653	66,2
103	0,647	0,646	65,5
105	0,640	0,639	64,7
107	0,633	0,632	64,1
109	0,627	0,626	63,4
111	0,620	0,619	62,7
113	0,614	0,613	62,1
115	0,607	0,606	61,4
117	0,601	0,600	60,8
119	0,595	0,594	60,2
121	0,588	0,588	59,5
123	0,582	0,582	58,9
125	0,576	0,576	58,3
127	0,570	0,569	57,7
129	0,564	0,563	57,1
131	0,557	0,557	56,5
133	0,551	0,551	55,8
135	0,545	0,545	55,2
137	0,540	0,539	54,7
139	0,534	0,534	54,1
141	0,529	0,528	53,5
143	0,523	0,523	52,9
145	0,518	0,517	52,4
147	0,512	0,511	51,8
149	0,507	0,506	51,2
151	0,501	0,500	50,7
153	0,496	0,495	50,1
155	0,490	0,489	49,5
157	0,485	0,484	49
159	0,480	0,479	48,5
161	0,475	0,474	48
163	0,470	0,469	47,5
165	0,465	0,464	47
167	0,459	0,459	46,5
169	0,454	0,454	46
171	0,449	0,449	45,5
173	0,444	0,444	45
175	0,439	0,439	44,5
177	0,434	0,434	44
179	0,430	0,430	43,5
181	0,425	0,425	43,1
183	0,421	0,421	42,6
185	0,416	0,416	42,1
187	0,411	0,411	41,7
189	0,407	0,407	41,2
191	0,402	0,402	40,7
193	0,398	0,398	40,3
195	0,393	0,393	39,8
197	0,389	0,389	39,4
199	0,385	0,385	39

200	0,384	0,384	38,4
201	0,382	0,382	38,7
203	0,378	0,378	38,3
205	0,374	0,374	37,9
207	0,370	0,370	37,5
209	0,366	0,366	37,1
211	0,363	0,363	36,7
213	0,359	0,359	36,4
215	0,355	0,355	36
217	0,351	0,351	35,6
219	0,347	0,347	35,2
221	0,344	0,344	34,8
223	0,340	0,340	34,4
225	0,336	0,336	34
227	0,332	0,332	33,7
229	0,328	0,328	33,3
231	0,325	0,325	32,9
233	0,321	0,321	32,5
235	0,317	0,317	32,1



Kurva PDD sinar-x 6 MV hasil pengukuran dengan detektor matriks

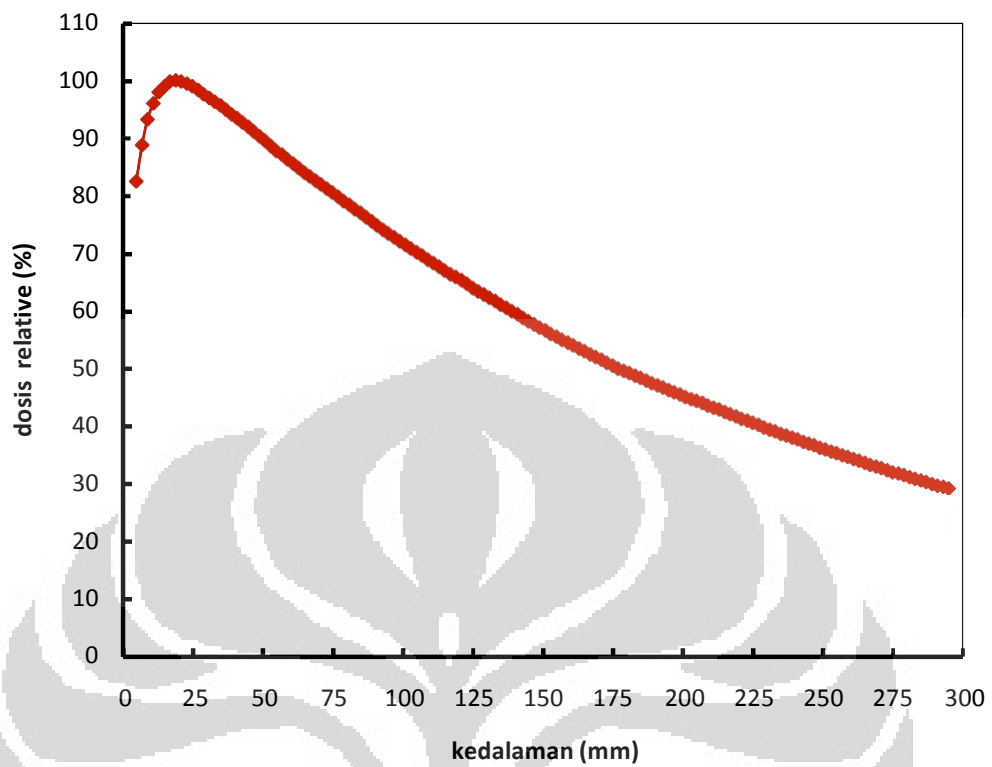
LAMPIRAN 2

Hasil Pengukuran PDD Sinar-X 10 MV dengan Detektor Matriks

Kedalaman (mm)	Dosis Maksimum (Gy)	Dosis pada Sumbu Utama	Normalisasi
5	0,836	0,806	82,5
7	0,900	0,868	88,8
9	0,943	0,911	93,2
11	0,968	0,938	96
13	0,988	0,957	98
15	0,998	0,967	99
17	1,006	0,975	99,8
19	1,009	0,977	100
21	1,005	0,975	99,8
23	1,001	0,971	99,4
25	0,997	0,967	99
27	0,990	0,960	98,3
29	0,982	0,954	97,6
31	0,975	0,947	96,9
33	0,967	0,941	96,3
35	0,960	0,934	95,6
37	0,952	0,927	94,9
39	0,944	0,920	94,1
41	0,936	0,912	93,4
43	0,928	0,905	92,7
45	0,920	0,898	91,9
47	0,912	0,890	91,1
49	0,903	0,882	90,3
51	0,895	0,874	89,5
53	0,886	0,866	88,6
55	0,878	0,858	87,8
57	0,870	0,851	87,1
59	0,862	0,843	86,3
61	0,855	0,836	85,5
63	0,847	0,828	84,8
65	0,839	0,821	84
67	0,831	0,814	83,3
69	0,824	0,807	82,6
71	0,816	0,800	81,9
73	0,809	0,793	81,2
75	0,801	0,786	80,5
77	0,794	0,779	79,8
79	0,787	0,772	79,1
81	0,779	0,766	78,4
83	0,772	0,759	77,7
85	0,765	0,752	77
87	0,758	0,745	76,3
89	0,751	0,738	75,5
91	0,745	0,731	74,8
93	0,738	0,724	74,1
95	0,731	0,717	73,4
97	0,724	0,711	72,8

99	0,717	0,705	72,1
101	0,710	0,698	71,5
103	0,703	0,692	70,8
105	0,696	0,686	70,2
107	0,690	0,680	69,6
109	0,684	0,674	68,9
111	0,677	0,667	68,3
113	0,671	0,661	67,7
115	0,665	0,655	67
117	0,659	0,649	66,4
119	0,653	0,643	65,9
121	0,646	0,638	65,3
123	0,640	0,632	64,7
125	0,634	0,625	64
127	0,628	0,619	63,4
129	0,622	0,614	62,8
131	0,617	0,608	62,3
133	0,611	0,603	61,7
135	0,605	0,597	61,1
137	0,599	0,591	60,5
139	0,593	0,586	60
141	0,588	0,580	59,4
143	0,582	0,575	58,8
145	0,576	0,569	58,2
147	0,571	0,564	57,7
149	0,566	0,558	57,1
151	0,560	0,553	56,6
153	0,555	0,547	56
155	0,550	0,542	55,5
157	0,545	0,537	55
159	0,540	0,532	54,5
161	0,534	0,528	54
163	0,529	0,523	53,5
165	0,524	0,518	53
167	0,519	0,513	52,5
169	0,514	0,508	52
171	0,509	0,503	51,5
173	0,504	0,498	51
175	0,499	0,493	50,5
177	0,497	0,489	50
179	0,495	0,485	49,6
181	0,492	0,481	49,2
183	0,490	0,477	48,8
185	0,488	0,473	48,4
187	0,486	0,468	47,9
189	0,484	0,464	47,5
191	0,481	0,460	47,1
193	0,479	0,456	46,7
195	0,477	0,452	46,3
197	0,473	0,448	45,9
199	0,468	0,445	45,5
201	0,464	0,441	45,1
203	0,459	0,437	44,7
205	0,455	0,434	44,4
207	0,451	0,430	44

209	0,446	0,426	43,6
211	0,442	0,422	43,2
213	0,437	0,419	42,9
215	0,433	0,415	42,5
217	0,429	0,411	42,1
219	0,425	0,408	41,7
221	0,422	0,404	41,3
223	0,418	0,400	41
225	0,414	0,397	40,6
227	0,410	0,393	40,2
229	0,406	0,389	39,8
231	0,403	0,385	39,4
233	0,399	0,382	39,1
235	0,395	0,378	38,7
237	0,391	0,375	38,4
239	0,388	0,371	38
241	0,384	0,368	37,7
243	0,380	0,365	37,3
245	0,377	0,362	37
247	0,373	0,358	36,7
249	0,369	0,355	36,3
251	0,365	0,352	36
253	0,362	0,348	35,6
255	0,358	0,345	35,3
257	0,355	0,342	35
259	0,352	0,339	34,7
261	0,349	0,335	34,3
263	0,346	0,332	34
265	0,343	0,329	33,7
267	0,339	0,326	33,3
269	0,336	0,323	33
271	0,333	0,319	32,7
273	0,330	0,316	32,4
275	0,327	0,313	32
277	0,324	0,310	31,8
279	0,321	0,307	31,5
281	0,318	0,305	31,2
283	0,315	0,302	30,9
285	0,313	0,299	30,6
287	0,310	0,296	30,3
289	0,307	0,293	30
291	0,304	0,291	29,7
293	0,301	0,288	29,5
295	0,298	0,285	29,2

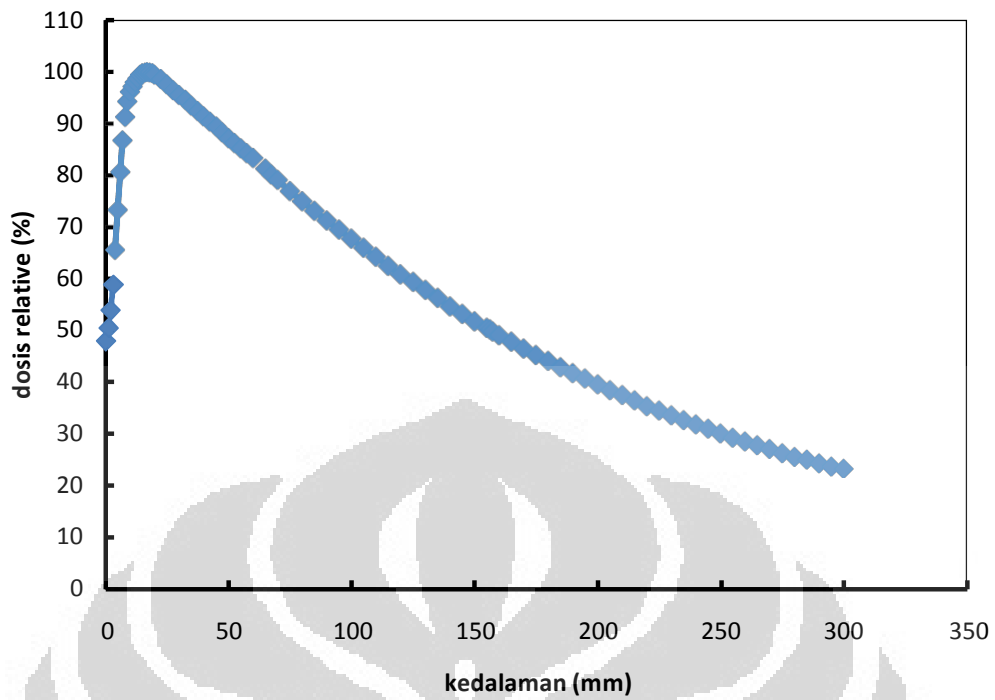


Kurva PDD sinar-x 10 MV hasil pengukuran dengan detektor matriks

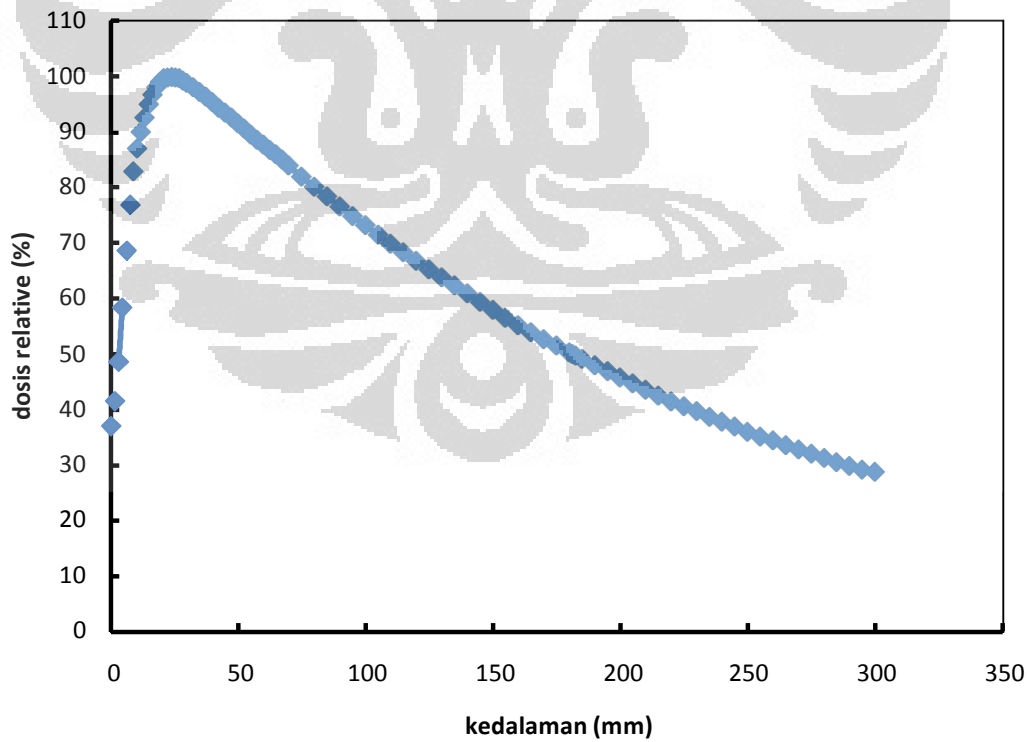
LAMPIRAN 3

Hasil pengukuran PDD berkas sinar-x 6 MV dan 10 MV menggunakan fantom air

Kedalaman	6 MV	10 MV	Kedalaman	6 MV	10 MV
0,0	48,0	37,0	35,0	93,5	97,3
1,0	50,5		37,5	92,4	96,5
1,5		41,6	40,0	91,4	95,5
2,0	53,9		42,5	90,4	94,5
3,0	58,9	48,7	45,0	89,4	93,6
4,5		58,4	47,5	88,3	92,7
4,0	65,6		50,0	87,2	91,7
5,0	73,3		52,5	86,2	90,7
6,0	80,7	68,6	55,0	85,2	89,7
7,0	86,8		57,5	84,3	88,7
7,5		76,9	60,0	83,3	87,8
8,0	91,3		62,5		86,9
9,0	94,3	83,0	65,0	81,3	86,1
10,0	96,1		67,5	80,2	85,1
10,5		87,2	70,0	79,1	84,1
11,0	97,2		75,0	77,0	82,1
12,0	98,0	90,1	80,0	75,0	80,2
13,0	98,7		85,0	73,1	78,5
13,5		92,7	90,0	71,3	76,7
14,0	99,4		95,0	69,5	75,0
15,0	99,8	95,1	100,0	67,8	73,3
16,0	99,9		105,0	66,0	71,6
16,5		96,9	110,0	64,3	70,0
17,0	100,0		115,0	62,5	68,4
18,0	99,9	98,2	120,0	60,9	66,9
19,0	99,8		125,0	59,4	65,4
19,5		99,2	130,0	57,9	63,9
20,0	99,5		135,0	56,3	62,5
21,0		99,8	140,0	54,7	61,0
22,5	98,6	99,9	145,0	53,2	59,5
24,0		100,0	150,0	51,8	58,1
25,0	97,6		155,0	50,5	56,6
25,5		99,9	156,3	50,2	
27,0		99,8	157,5	49,8	
27,5	96,5		160,0	49,1	55,3
28,5		99,4	165,0	47,8	54,0
30,0	95,5	99,0	170,0	46,5	52,8
32,5	94,6	98,2	175,0	45,3	51,6
180,0	44,1	50,4	240,0	31,9	37,9
181,3		50,1	245,0	31,0	37,0
182,5		49,8	250,0	30,1	36,1
185,0	42,9	49,2	255,0	29,3	35,2
190,0	41,8	48,1	260,0	28,5	34,5
195,0	40,7	47,0	265,0	27,8	33,7
200,0	39,6	45,9	270,0	27,1	32,9
205,0	38,5	44,8	275,0	26,3	32,1
210,0	37,5	43,7	280,0	25,6	31,4
215,0	36,5	42,6	285,0	25,0	30,6
220,0	35,4	41,6	290,0	24,3	29,9
225,0	34,5	40,7	295,0	23,7	29,3
230,0	33,6	39,8	300,0	23,3	28,9
235,0	32,7	38,8			

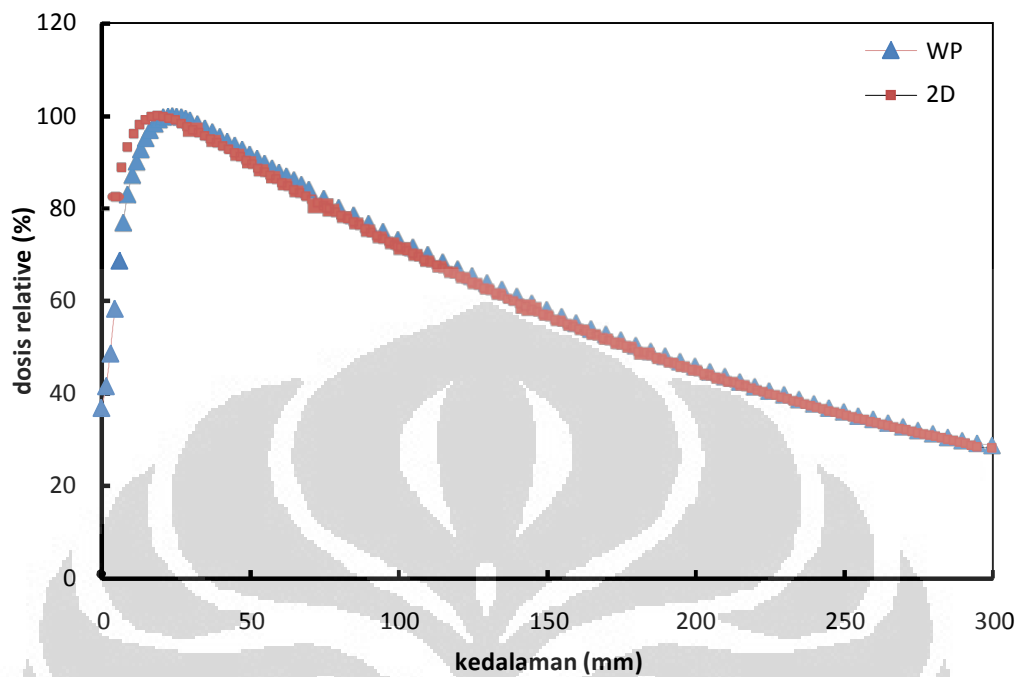


Kurva PDD sinar-x 6 MV hasil pengukuran dengan fantom air

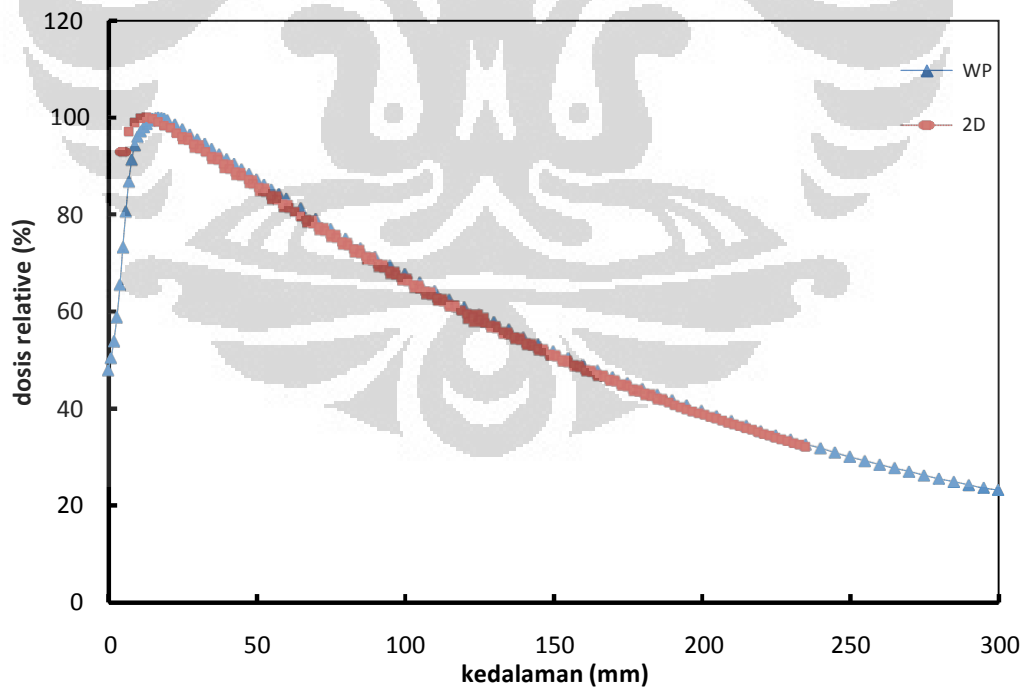


Kurva PDD sinar-x 10 MV hasil pengukuran dengan fantom air

Kurva Perbandingan PDD Sinar-X antara Detektor Matriks dan Fantom Air



Perbandingan PDD sinar-x 10 MV antara detektor matriks dan fantom air



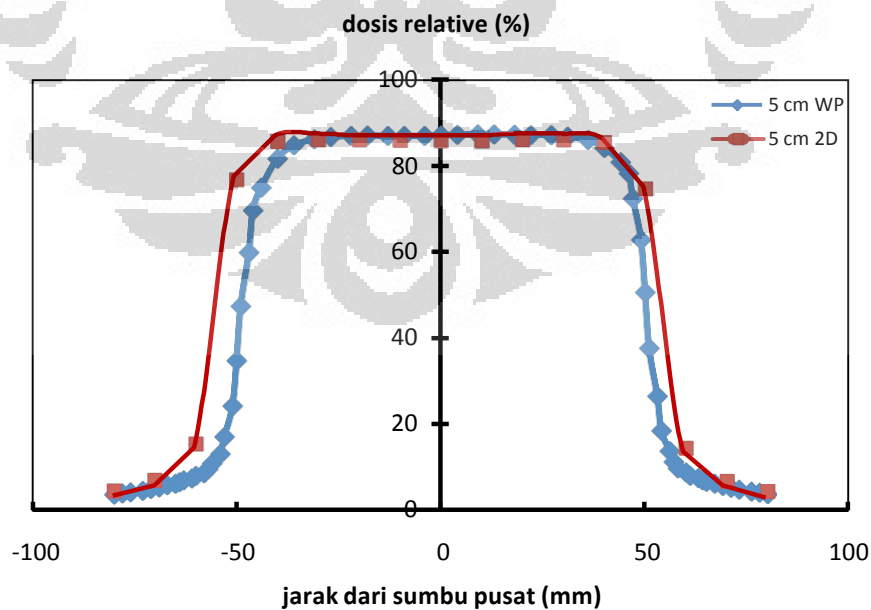
Perbandingan PDD sinar-x 6 MV antara detektor matriks dan fantom air

LAMPIRAN 4

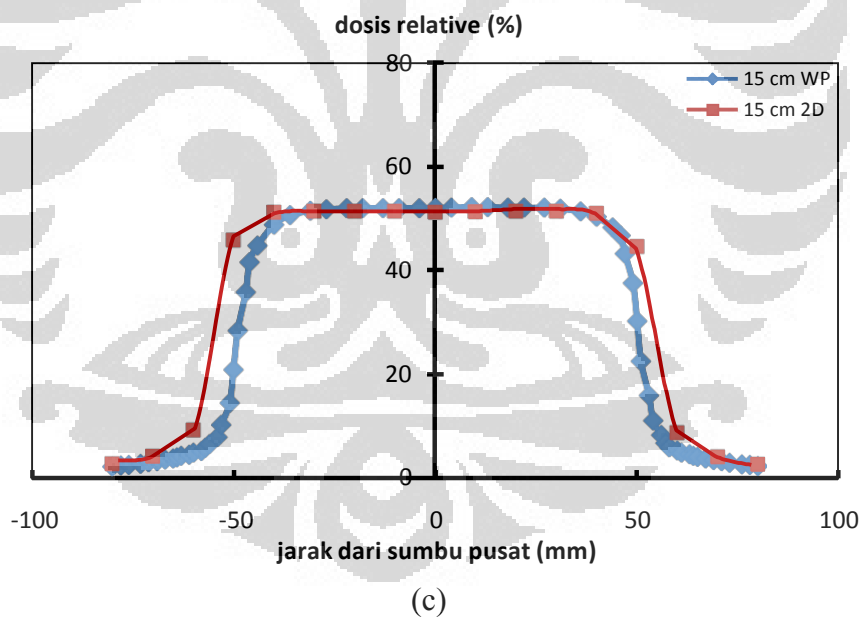
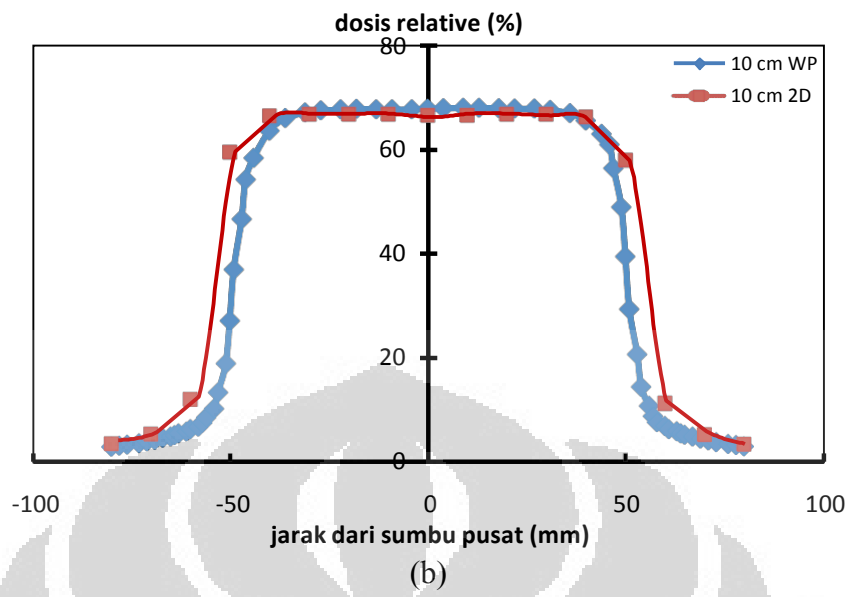
Hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 6 MV pada variasi kedalaman 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.

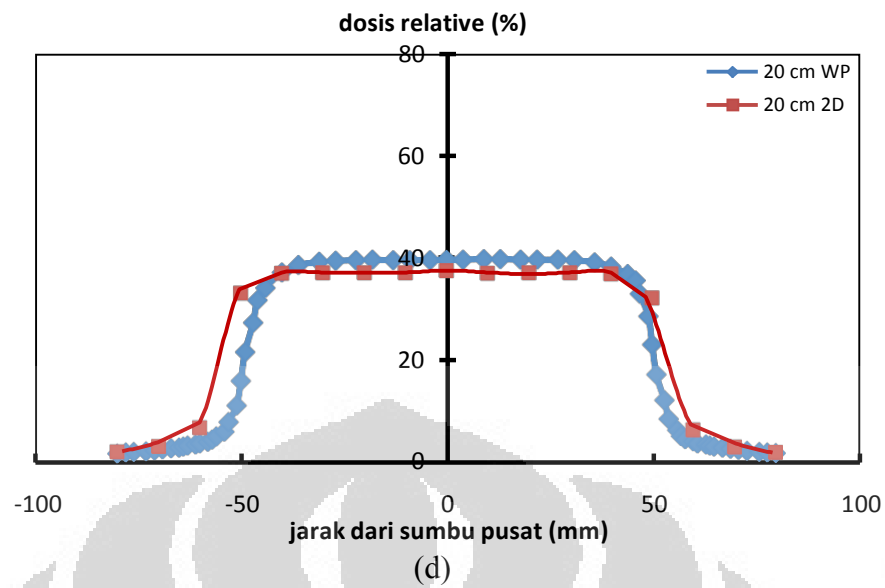
Kordinat lapangan (mm)	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	WP	γD	WP	γD	WP	γD	WP	γD
-80	3,66	4,51	2,85	3,50	2,18	2,68	1,66	1,94
-78	3,92		3,05		2,33		1,78	
-76	4,19		3,25		2,49		1,90	
-73	4,53		3,53		2,69		2,06	
-70		6,93		5,37		4,12		2,98
-71	4,97		3,86		2,95		2,26	
-69	5,32		4,14		3,16		2,42	
-67	5,84		4,54		3,47		2,65	
-65	6,19		4,81		3,68		2,81	
-64	6,54		5,09		3,89		2,97	
-63	6,98		5,42		4,14		3,17	
-61	7,41		5,76		4,40		3,37	
-60	8,02	15,43	6,24	11,96	4,77	9,16	3,64	6,63
-58	8,63		6,71		5,13		3,92	
-57	9,59		7,46		5,70		4,36	
-56	10,90		8,48		6,48		4,95	
-54	13,08		10,17		7,77		5,94	
-53	17,09		13,29		10,15		7,76	
-51	24,24		18,85		14,40		11,01	
-50	34,79	76,75	27,05	59,49	20,67	45,58	15,80	33,01
-49	47,44		36,88		28,18		21,54	
-47	59,91		46,58		35,59		27,21	
-46	69,67		54,17		41,39		31,64	
-44	74,99		58,31		44,55		34,06	
-40	81,71	85,69	63,53	66,41	48,54	50,88	37,11	36,85
-36	84,85		65,97		50,40		38,53	
-31	86,24		67,05		51,23		39,16	
-30		86,09		66,72		51,12		37,02
-27	86,76		67,46		51,54		39,40	
-22	87,03		67,66		51,70		39,52	
-20		86,03		66,68		51,09		37,00
-18	87,11		67,73		51,75		39,56	
-13	87,03		67,66		51,70		39,52	
-10		86,02		66,67		51,08		36,99
-9	87,03		67,66		51,70		39,52	
-4	87,03		67,66		51,70		39,52	
0	87,2	85,80	67,8	66,5	51,8	50,95	39,6	38,4
4	87,29		67,87		51,85		39,64	
9	87,37		67,94		51,90		39,68	
10		85,84		66,53		50,98		36,92
13	87,37		67,94		51,90		39,68	
18	87,29		67,87		51,85		39,64	
20		86,06		66,70		51,10		37,01
22	87,20		67,80		51,80		39,60	
27	87,20		67,80		51,80		39,60	

30		86,09		66,72		51,12		37,02
31	86,85		67,53		51,59		39,44	
36	86,07		66,92		51,13		39,09	
40	84,24	85,41	65,49	66,19	50,04	50,72	38,25	36,73
44	80,92		62,92		48,07		36,75	
46	78,31		60,88		46,52		35,56	
47	72,46		56,34		43,05		32,91	
49	62,87		48,88		37,35		28,55	
50	50,66	74,66	39,39	57,86	30,10	44,33	23,01	32,11
51	37,67		29,29		22,38		17,11	
53	26,51		20,61		15,75		12,04	
54	18,49		14,37		10,98		8,40	
56	13,78		10,71		8,18		6,26	
57	11,25		8,75		6,68		5,11	
58	9,77		7,59		5,80		4,44	
60	8,81	14,47	6,85	11,22	5,23	8,59	4,00	6,22
61	8,02		6,24		4,77		3,64	
63	7,50		5,83		4,45		3,41	
64	6,98		5,42		4,14		3,17	
65	6,63		5,15		3,94		3,01	
67	6,19		4,81		3,68		2,81	
69	5,67		4,41		3,37		2,57	
70		6,69		5,19		3,98		2,88
71	5,23		4,07		3,11		2,38	
73	4,80		3,73		2,85		2,18	
76	4,36		3,39		2,59		1,98	
78	4,10		3,19		2,43		1,86	
80	3,75	4,37	2,92	3,38	2,23	2,59	1,70	1,88



(a)





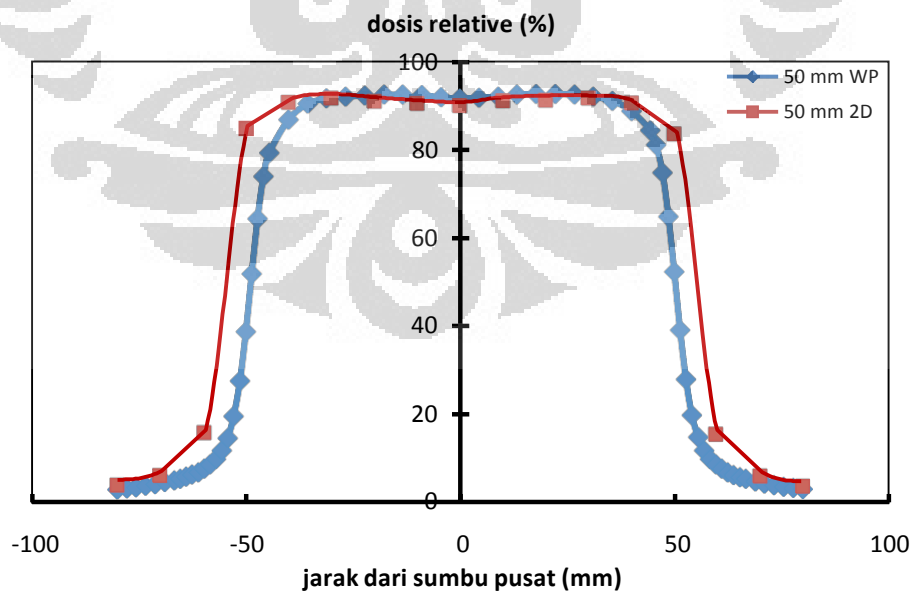
Perbandingan profil dosis berkas sinar-x 6 MV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm dan (d) 20 cm

LAMPIRAN 5

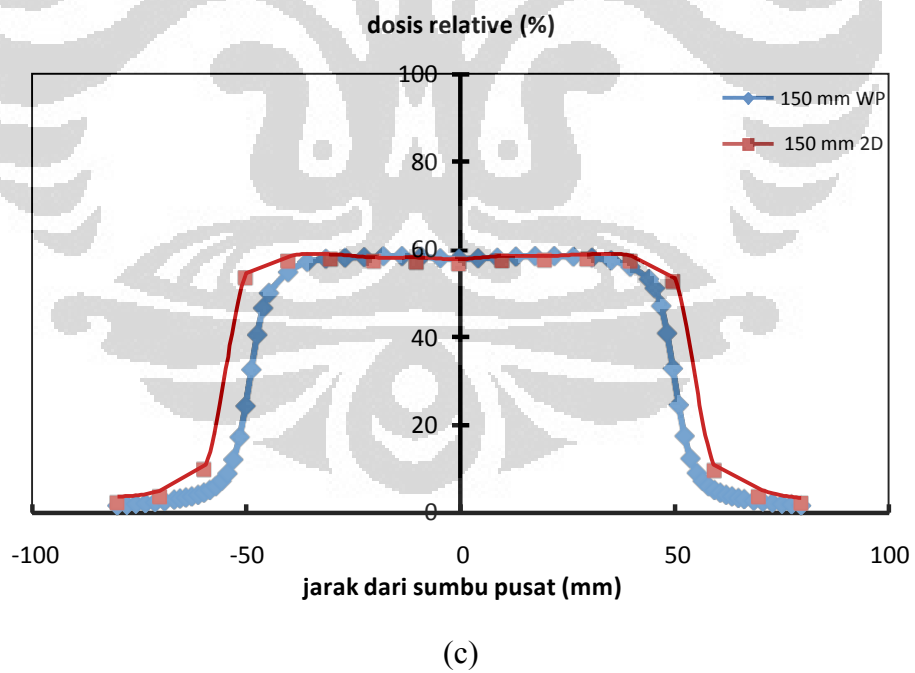
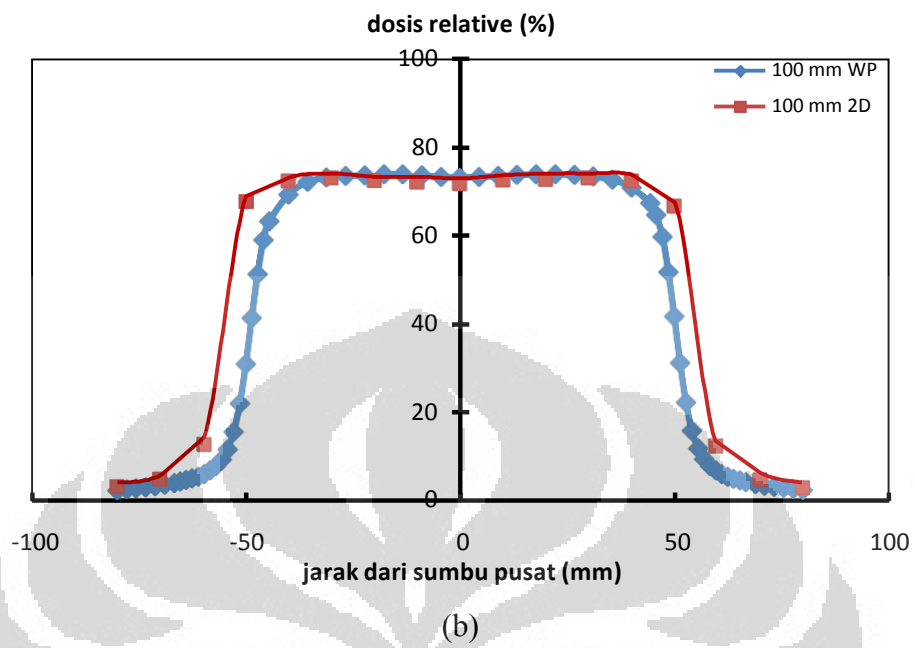
Hasil pengukuran profil dosis berkas sinar-x 10 MV pada variasi kedalaman 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm menggunakan detektor matriks dan fantom air.

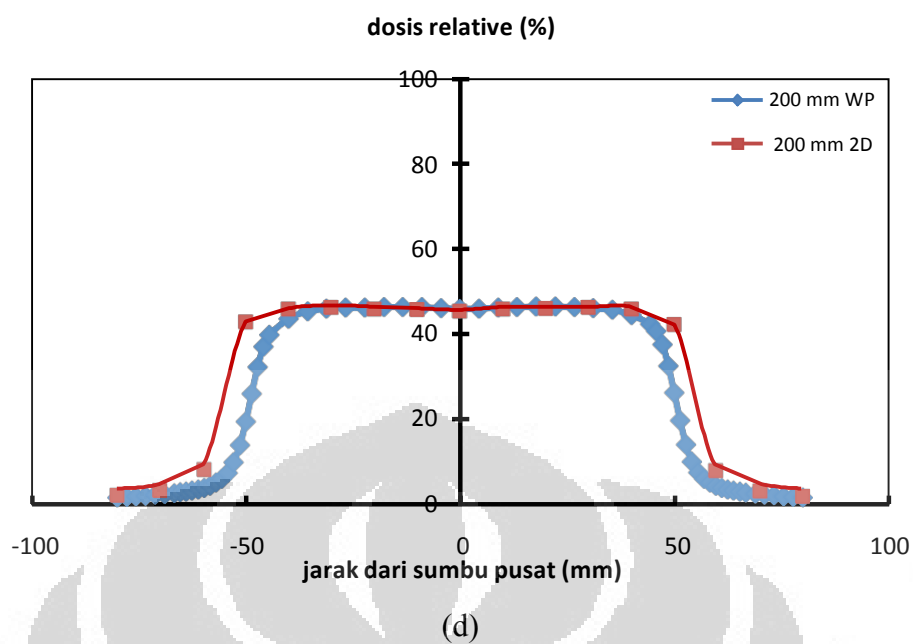
	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	WP	2D	WP	2D	WP	2D	WP	2D
-80	3,12	4,10	2,49	3,27	1,98	2,60	1,56	2,1
-78	3,39		2,71		2,15		1,70	
-76	3,67		2,93		2,32		1,84	
-73	3,94		3,15		2,50		1,97	
-71	4,31		3,45		2,73		2,16	
-70		6,30		5,03		4,00		3,2
-69	4,77		3,81		3,02		2,39	
-67	5,23		4,18		3,31		2,62	
-65	5,59		4,47		3,54		2,80	
-64	6,05		4,84		3,83		3,03	
-63	6,51		5,20		4,13		3,26	
-61	7,06		5,64		4,47		3,53	
-60	7,79	16,00	6,23	12,80	4,94	10,20	3,90	8,1
-58	8,80		7,04		5,58		4,41	
-57	10,09		8,06		6,39		5,05	
-56	11,92		9,53		7,55		5,97	
-54	14,76		11,80		9,35		7,39	
-53	19,72		15,76		12,49		9,87	
-51	27,69		22,14		17,55		13,86	
-50	38,88	84,80	31,08	67,70	24,63	53,70	19,46	42,7
-49	51,90		41,49		32,88		25,98	
-47	64,37		51,46		40,79		32,22	
-46	73,91		59,08		46,83		37,00	
-44	79,32		63,40		50,26		39,70	
-40	86,84	90,70	69,42	72,46	55,02	57,40	43,47	45,7
-36	90,42		72,27		57,29		45,26	
-31	91,70		73,30		58,10		45,90	
-30		91,70		73,20		58,00		46,2
-29								
-27	92,07		73,59		58,33		46,08	
-22	92,25		73,74		58,45		46,18	
-20		90,90		72,60		57,50		45,8
-18	92,53		73,96		58,62		46,31	
-13	92,53		73,96		58,62		46,31	
-11								
-10		90,40		72,20		57,20		45,6
-9	92,34		73,81		58,51		46,22	
-4	91,88		73,45		58,22		45,99	
0	91,7	89,9	73,3	71,8	58,1	56,9	45,9	45,3
4	91,79		73,37		58,16		45,95	
9	92,07		73,59		58,33		46,08	
10		91,00		72,70		57,60		45,8
13	92,43		73,89		58,56		46,27	
18	92,62		74,03		58,68		46,36	
20		91,20		72,80		57,70		45,9
22	92,62		74,03		58,68		46,36	

27	92,43		73,89		58,56		46,27	
30		91,60		73,20		58,00		46,2
31	91,98		73,52		58,27		46,04	
36	91,06		72,79		57,69		45,58	
40	88,77	90,60	70,95	72,40	56,24	57,40	44,43	45,7
44	84,36		67,44		53,45		42,23	
46	81,15		64,87		51,42		40,62	
47	74,83		59,81		47,41		37,45	
49	64,92		51,90		41,13		32,50	
50	52,36	83,50	41,85	66,70	33,18	52,80	26,21	42,1
51	39,25		31,37		24,87		19,65	
53	28,06		22,43		17,78		14,05	
54	19,99		15,98		12,67		10,01	
56	14,95		11,95		9,47		7,48	
57	12,01		9,60		7,61		6,01	
58	10,09		8,06		6,39		5,05	
60	8,80	15,60	7,04	12,50	5,58	9,90	4,41	7,9
61	7,79		6,23		4,94		3,90	
63	7,06		5,64		4,47		3,53	
64	6,42		5,13		4,07		3,21	
65	5,96		4,76		3,78		2,98	
67	5,50		4,40		3,49		2,75	
69	4,95		3,96		3,14		2,48	
70		6,10		4,90		3,90		3,1
71	4,49		3,59		2,85		2,25	
73	4,13		3,30		2,61		2,07	
76	3,76		3,01		2,38		1,88	
78	3,48		2,79		2,21		1,74	
80	3,21	3,90	2,57	3,10	2,03	2,50	1,61	1,9



(a)



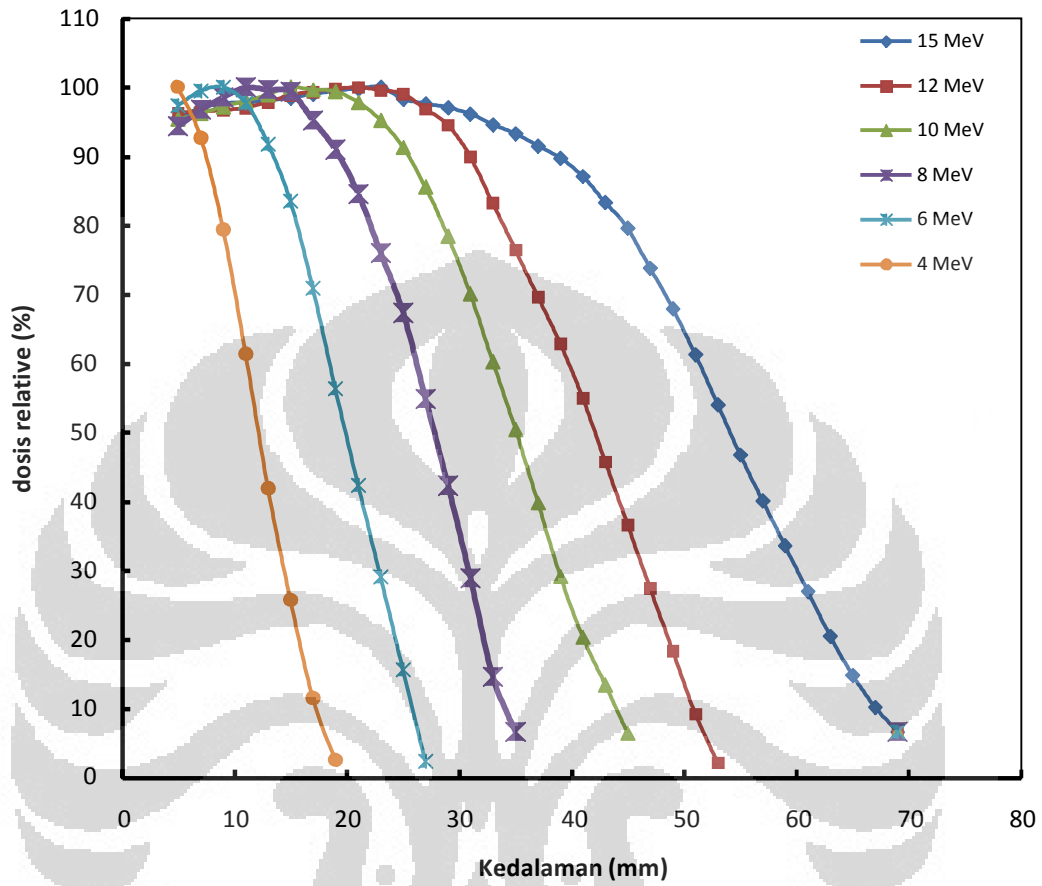


Perbandingan profil dosis berkas sinar-x 10 MV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm dan (d) 20 cm

LAMPIRAN 6

Hasil pengukuran PDD menggunakan detektor matriks untuk berkas elektron 4 MeV - 15 MeV.

Kedalaman (mm)	Berkas Elektron					
	15 MeV	12 MeV	10 MeV	8 MeV	6 MeV	4 MeV
5	95,6	96,3	95,4	94,4	97,3	100,0
7	97,0	96,5	96,2	96,8	99,5	92,7
9	97,7	96,8	97,2	98,6	100	79,4
11	97,8	97,0	98,0	100,0	97,7	61,4
13	98,1	97,9	99,0	99,7	91,8	41,9
15	98,5	98,9	100,0	99,4	83,5	25,8
17	99,0	99,4	99,7	95,2	70,9	11,6
19	99,5	99,8	99,4	91,0	56,4	2,6
21	99,8	100,0	97,9	84,6	42,4	
23	100,0	99,6	95,2	76,0	29,1	
25	98,3	99,1	91,3	67,4	15,7	
27	97,7	96,8	85,6	54,9	2,4	
29	97,1	94,5	78,5	42,3		
31	96,2	90,0	70,1	29,0		
33	94,6	83,3	60,3	14,6		
35	93,3	76,5	50,5	6,7		
37	91,6	69,7	39,9			
39	89,8	62,9	29,2			
41	87,1	55,0	20,4			
43	83,4	45,8	13,5			
45	79,7	36,7	6,5			
47	73,8	27,5				
49	68,0	18,4				
51	61,3	9,3				
53	54,1	2,2				
55	46,8					
57	40,2					
59	33,6					
61	27,0					
63	20,5					
65	14,9					
67	10,3					
69	6,7					



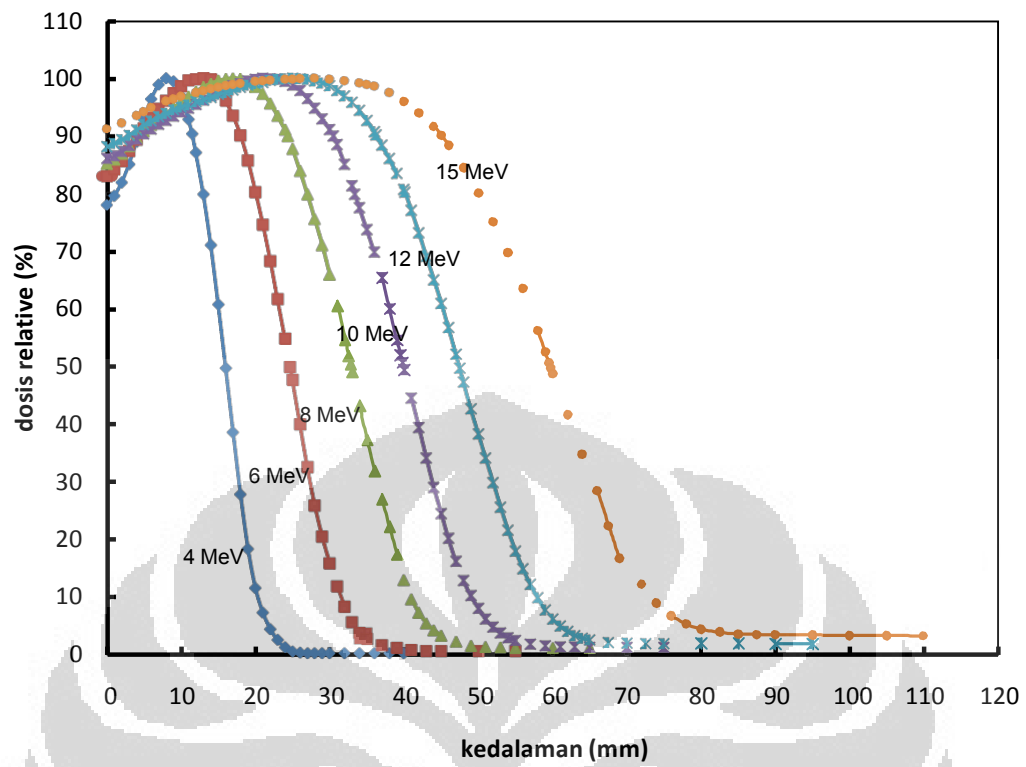
Kurva PDD berkas elektron menggunakan detektor matriks

LAMPIRAN 7

Hasil pengukuran PDD menggunakan fantom air untuk berkas elektron
4 MeV - 15 MeV.

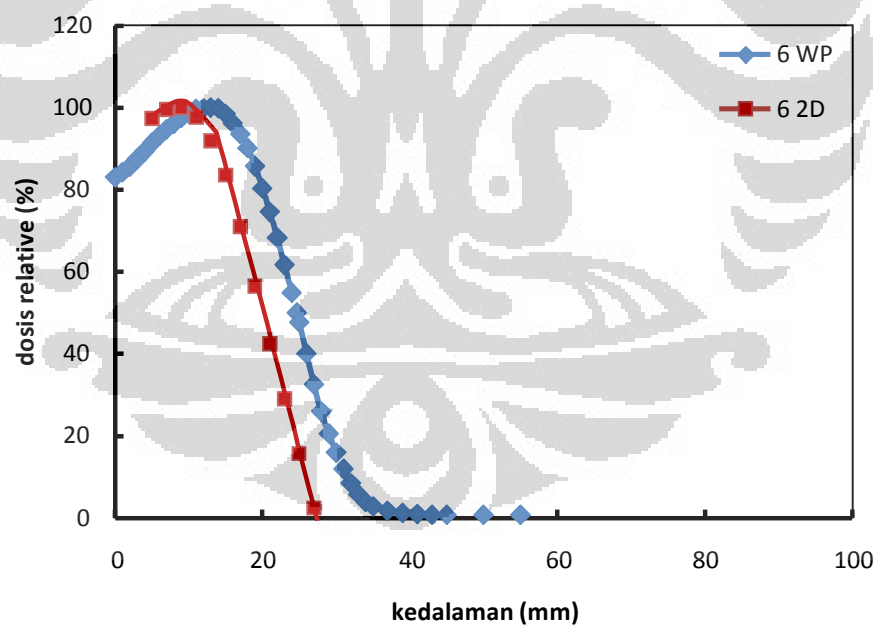
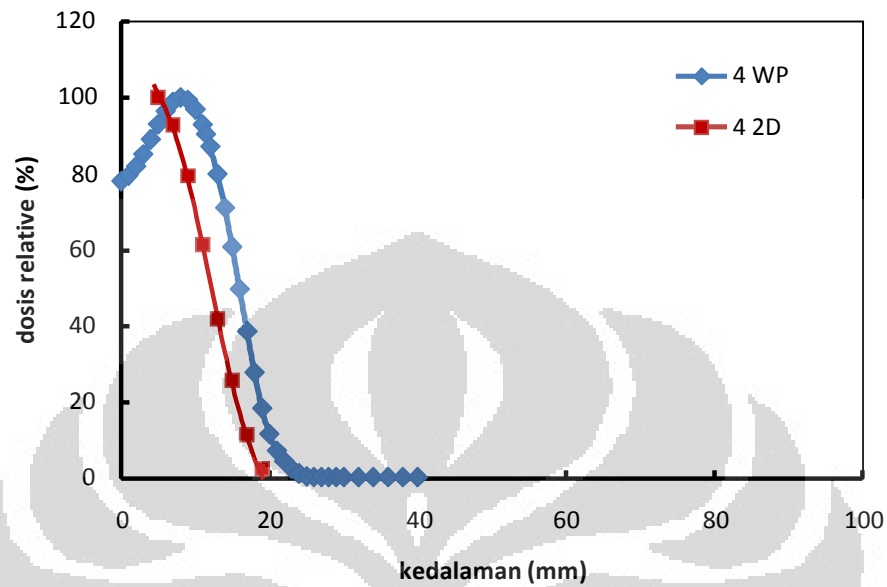
Kedalaman	Elektron (MeV)					
	4	6	8	10	12	15
0,0	78	83,0	85,2	86,1	88,1	91,2
1,0	79,6	84,2	85,9	86,6	88,7	
2,0	81,9	85,6	86,9	87,3	89,3	92,2
3,0	85,1	87,4	88,2	88,3	90,1	
4,0	89	89,3	89,6	89,4	91,0	93,5
5,0	93	91,3	90,8	90,4	91,9	94,2
6,0	96,4	93,1	91,9	91,2	92,6	94,9
7,0	98,9	94,7	92,9	92,0	93,3	
8,0	100	96,1	93,9	92,7	93,9	96,0
9,0	99,4	97,4	94,9	93,4	94,5	96,4
10,0	96,9	98,6	95,9	94,2	95,0	96,8
11,0	92,9	99,6	96,8	94,8	95,4	
11,5	90,4					
12,0	87,1	99,8	97,7	95,5	95,9	97,5
13,0	79,9	100,0	98,5	96,2	96,3	97,8
14,0	71,1	99,8	99,1	96,9	96,7	98,1
15,0	60,8	98,4	99,6	97,5	97,2	98,4
16,0	49,8	96,1	99,9	98,1	97,5	98,7
17,0	38,7	93,5	100,0	98,7	98,0	98,9
18,0	27,9	90,1	99,9	99,1	98,4	99,1
19,0	18,5	85,7	99,4	99,5	98,8	
20,0	11,7	80,3	98,5	99,8	99,1	99,4
21,0	7,4	74,6	97,3	100,0	99,3	99,5
22,0	4,6	68,3	95,6	99,9	99,6	99,6
23,0	2,7	61,7	93,5	99,8	99,8	
24,0	1,4	54,9	91,1	99,4	99,9	99,8
24,3			90,0			
24,7		50,0				
25,0	0,7	47,7	87,8	98,8	100,0	99,85
26,0	0,5	40,1	84,0	97,9	99,9	99,9
27,0	0,4	32,6	79,9	96,5	99,8	
28,0	0,4	26,0	75,6	94,8	99,5	100,0
29,0	0,4	20,6	71,1	93,0	99,2	
30,0	0,4	16,0	66,0	91,1	98,7	99,8
30,5				90,0		
31,0		12,0	60,5	88,5	97,9	
32,0	0,4	8,5	54,7	85,1	96,9	99,5
32,5			51,9			
32,8			50,4			
33,0		5,8	49,0	81,4	95,8	
33,4				79,9		
34,0	0,4	3,9	43,2	77,6	94,4	99,2
35,0		2,9	37,3	73,8	92,7	98,9
36,0	0,4		31,9	69,9	90,7	98,6
36,3					90,2	
37,0		1,8	27,0	65,4	88,4	
38,0	0,4		22,2	60,1	86,1	97,5
39,0		1,3	17,4	54,6	83,5	
39,5				52,0		
39,8				50,7		
40,0	0,4		13,1	49,4	80,7	96,0

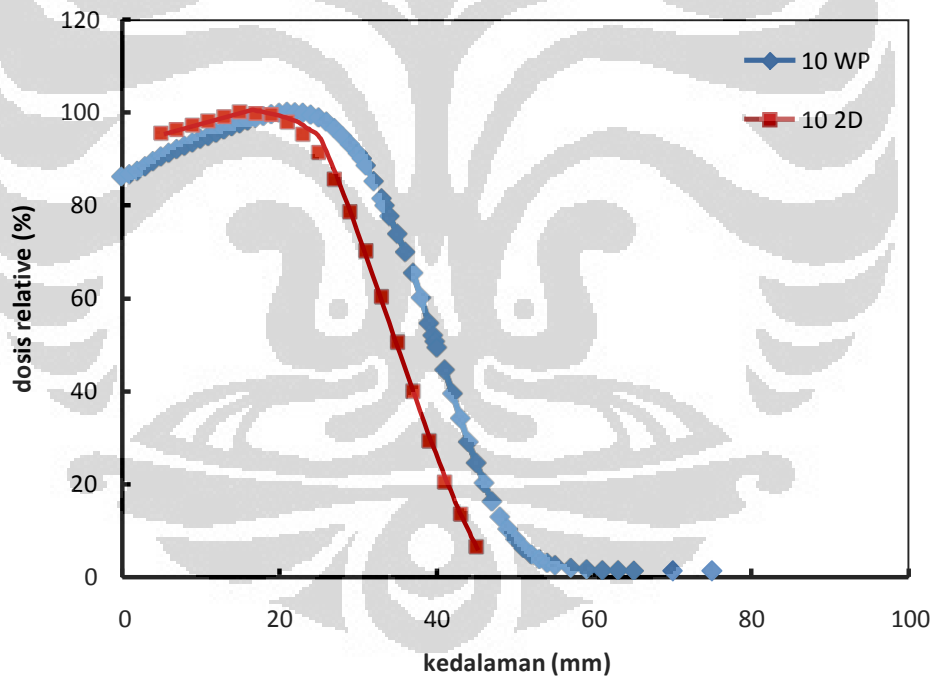
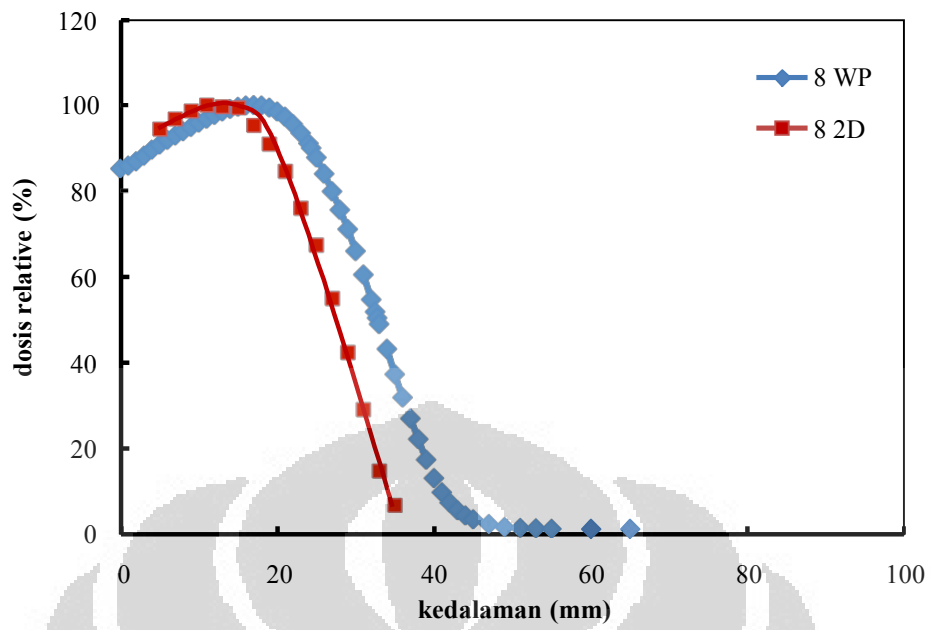
40,1					80,3	
41,0		1,0	9,8	44,6	77,1	
42,0			7,4	39,5	73,2	94,1
43,0		0,8	5,6	34,2	69,1	
44,0			4,4	29,1	65,1	91,7
45,0		0,8	3,5	24,6	61,0	90,2
46,0				20,3	56,8	88,4
47,0			2,4	16,3	52,2	
47,5					49,8	
48,0				13,0	47,4	84,5
49,0			1,7	10,4	42,7	
50,0		0,8		8,2	38,4	80,2
51,0			1,5	6,3	34,2	
52,0				4,9	30,0	75,2
53,0			1,4	3,9	25,7	
54,0				3,1	21,7	69,8
55,0		0,8	1,3	2,6	18,1	
56,0					15,0	63,6
57,0				2,0	12,4	
58,0					10,0	56,3
59,0				1,7	7,9	52,6
59,5						50,7
59,8						49,7
60,0			1,3		6,3	48,8
61,0				1,5	5,1	
62,0					4,2	41,6
63,0				1,5	3,5	
64,0					3,0	34,8
65,0			1,3	1,4	2,7	
66,0						28,5
67,5					2,3	22,4
69,0						16,7
70,0				1,4	2,2	
72,0						12,2
72,5					2,1	
74,0						8,9
75,0				1,4	2,1	
76,0						6,7
78,0						5,3
80,0					2,0	4,4
82,5						3,9
85,0					2,0	3,6
87,5						3,5
90,0					1,9	3,5
95,0					1,9	3,4
100,0						3,3
105,0						3,3
110,0						3,2

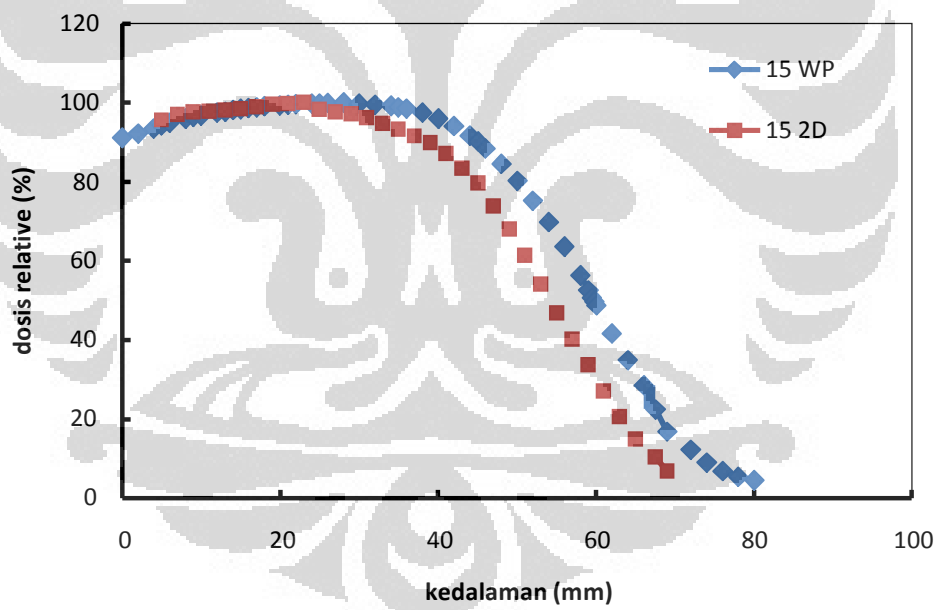
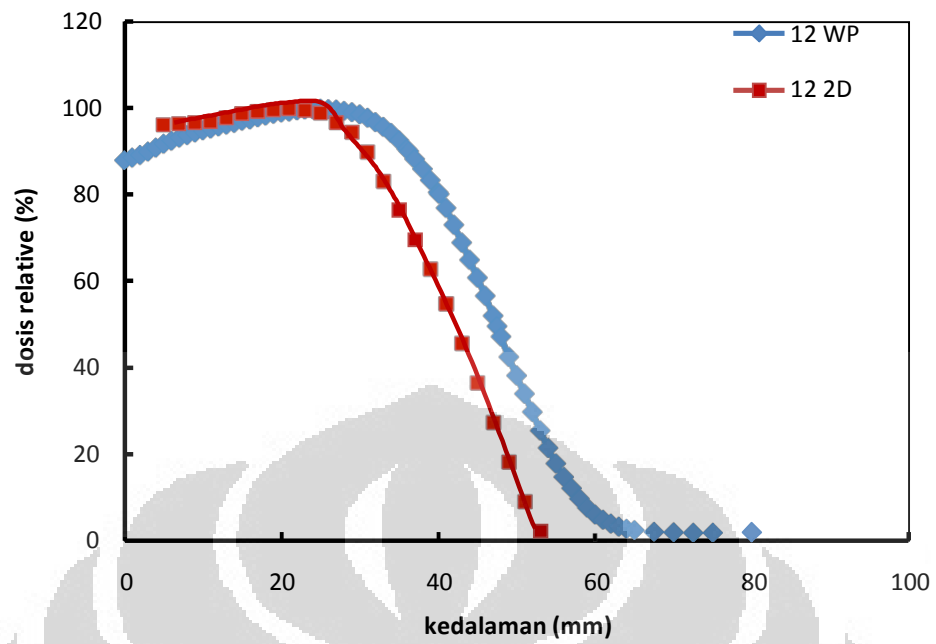


Kurva PDD berkas elektron menggunakan fantom air

Perbandingan PDD elektron 4 MeV-15 MeV
antara fantom air dan detektor matriks



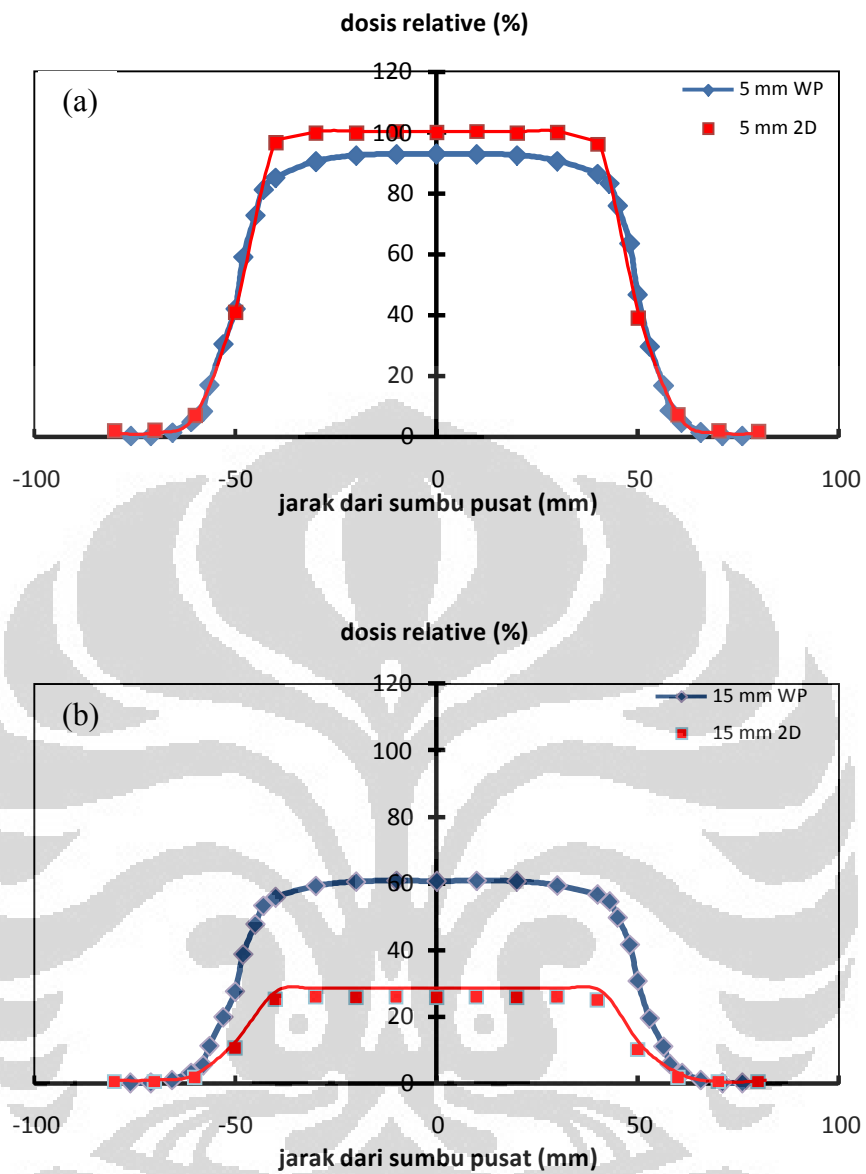




LAMPIRAN 8

Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 4 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

Koordinat Lapangan (mm)	5 mm		15 mm	
	WP	2D	WP	2D
-80		2,0		0,52
-76	0,35		0,23	
-71	0,48		0,32	
-70		2,2		0,57
-66	1,54		1,01	
-61	4,97		3,26	
-60		7,2		1,87
-58	8,46		5,55	
-56	17,11		11,22	
-53	30,49		20,00	
-50	42,04	40,9	27,57	10,63
-48	59,15		38,80	
-45	72,73		47,70	
-43	81,28		53,31	
-40	85,19	96,7	55,88	25,14
-30	90,49	99,8	59,35	25,95
-20	92,44	99,7	60,63	25,92
-10	92,91	100,3	60,94	26,08
0	93	100,0	61	26
10	92,91	100,3	60,94	26,08
20	92,54	99,7	60,70	25,92
30	90,68	99,9	59,48	25,97
40	86,40	96,1	56,67	24,99
43	83,24		54,60	
45	75,98		49,84	
48	63,61		41,72	
50	46,87	39,1	30,74	10,17
53	29,85		19,58	
56	16,93		11,10	
58	8,84		5,80	
60		7,3		1,90
61	4,84		3,17	
66	1,58		1,04	
70		2,0		0,52
71	0,48		0,32	
76	0,37		0,24	
80		1,9		0,49

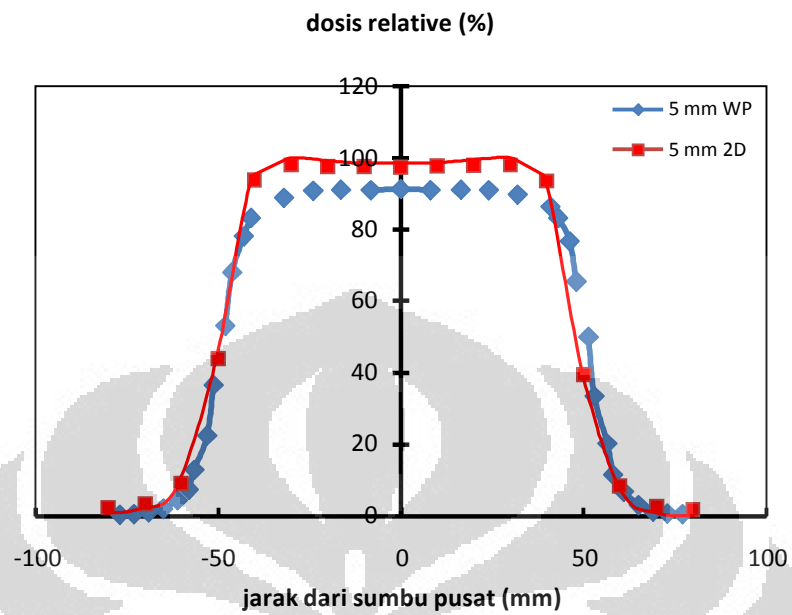


Perbandingan profil dosis berkas elektron 4 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm dan (b) 1,5 cm.

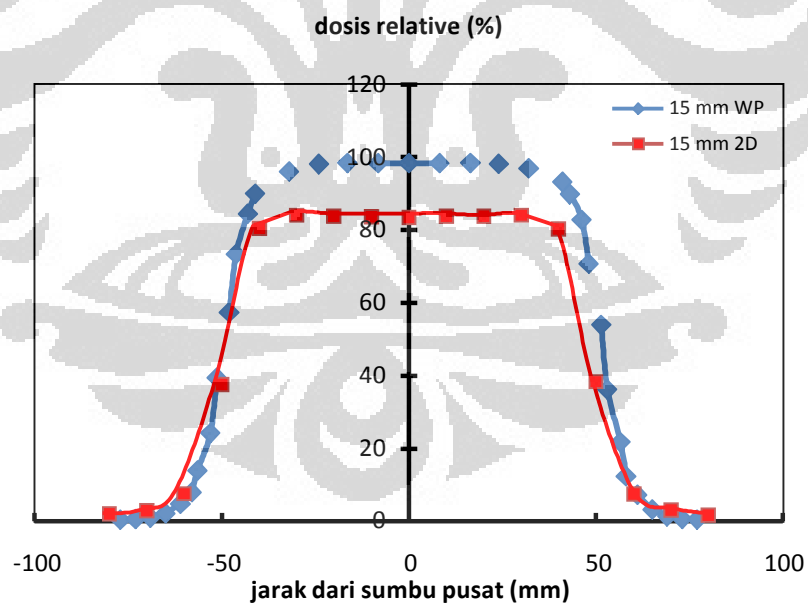
LAMPIRAN 9

Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 6 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

Koordinat Lapangan (mm)	5 mm		15 mm	
	WP	2D	WP	2D
-80		2,46		2,11
-77	0,46		0,49	
-73	0,64		0,69	
-70		3,46		2,97
-69	1,00		1,08	
-65	2,09		2,26	
-61	4,55		4,92	
-60		9,03		7,75
-58	7,46		8,07	
-56	13,01		14,07	
-53	22,48		24,30	
-51	36,58		39,56	
-50		43,91		37,68
-48	53,14		57,47	
-46	67,98		73,50	
-43	78,17		84,53	
-41	83,27		90,04	
-40		93,72		80,43
-32	88,91		96,14	
-30		97,91		84,03
-24	90,82		98,20	
-20		97,55		83,72
-16	91,09		98,50	
-10		97,49		83,67
-8	91,00		98,40	
0	91	97,30	98,4	83,50
8	91,00		98,40	
10		97,59		83,75
16	91,09		98,50	
20		97,71		83,85
24	90,91		98,30	
30		97,97		84,08
32	89,73		97,02	
40		93,46		80,20
41	86,27		93,28	
43	83,17		89,94	
46	76,62		82,85	
48	65,52		70,85	
50		39,50		38,38
51	49,96		54,02	
53	33,49		36,21	
56	20,20		21,84	
58	11,56		12,50	
60		8,41		7,46
61	6,83		7,38	
65	3,09		3,35	
69	1,37		1,48	
70		2,70		3,15
73	0,73		0,79	
77	0,55		0,59	
80		1,87		1,83



(a)



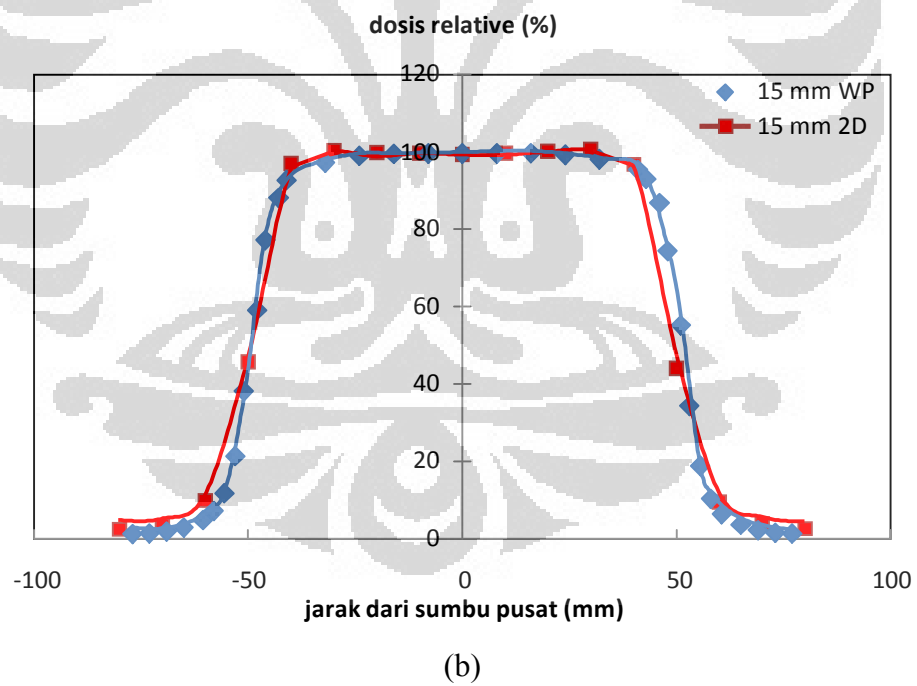
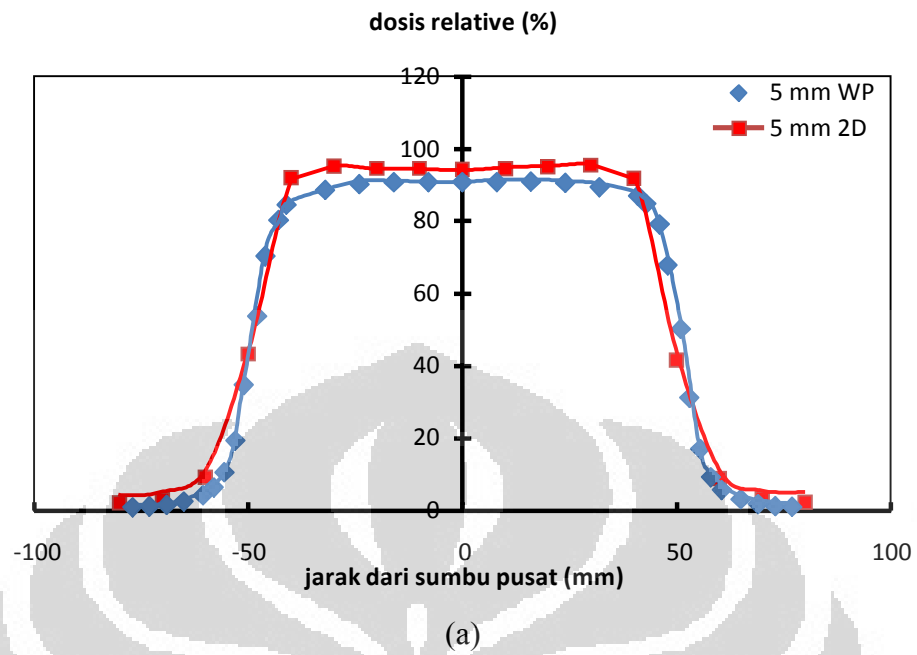
(b)

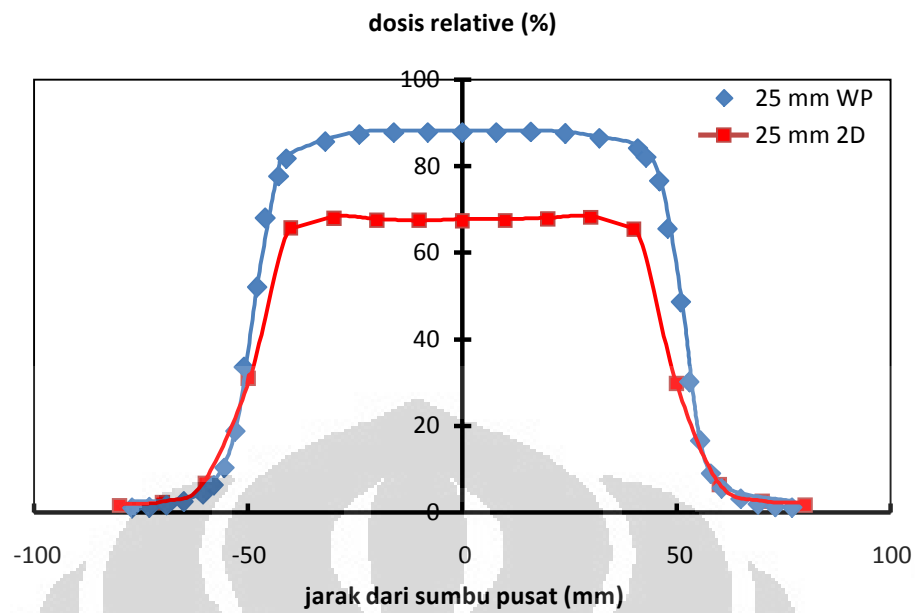
Perbandingan profil dosis berkas elektron 6 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm dan (b) 1,5 cm.

LAMPIRAN 10

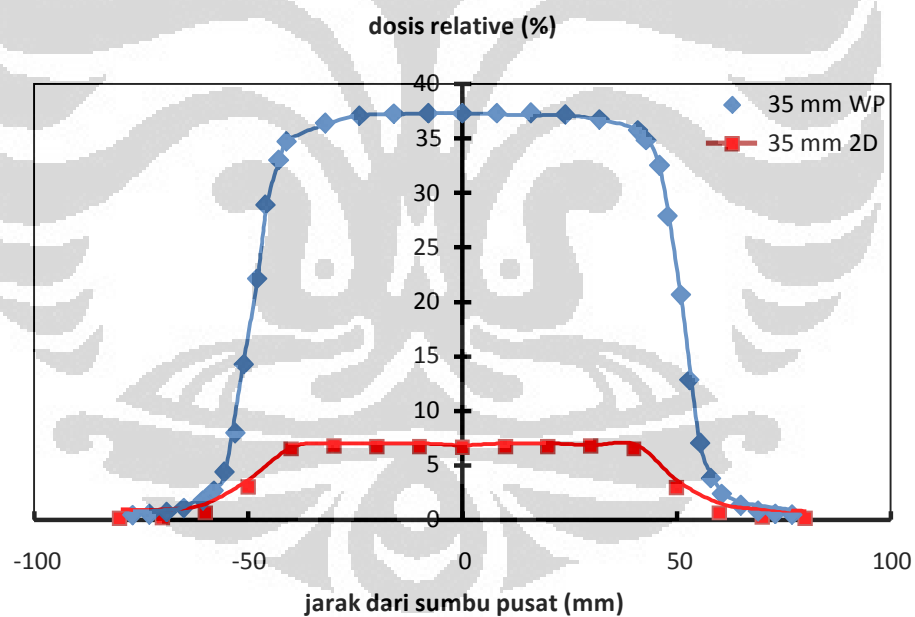
Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 8 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

	5 mm		15 mm		25 mm		35 mm	
	WP	2D	WP	2D	WP	2D	WP	2D
-80		2,28		2,40		1,62		0,16
-77	1,09		1,20		1,05		0,45	
-73	1,27		1,39		1,23		0,52	
-70		3,15		3,32		2,25		0,22
-69	1,73		1,89		1,67		0,71	
-65	2,63		2,89		2,55		1,08	
-61	4,36		4,78		4,21		1,79	
-60		9,31		9,80		6,65		0,66
-58	6,54		7,17		6,32		2,69	
-56	10,71		11,75		10,36		4,40	
-53	19,43		21,31		18,79		7,98	
-51	34,78		38,15		33,63		14,29	
-50		43,35		45,64		30,95		3,08
-48	53,84		59,06		52,07		22,12	
-46	70,37		77,19		68,05		28,91	
-43	80,36		88,15		77,70		33,01	
-41	84,53		92,73		81,74		34,73	
-40		92,11		96,98		65,76		6,54
-32	88,62		97,21		85,69		36,40	
-30		95,21		100,25		67,98		6,76
-24	90,26		99,00		87,27		37,08	
-20		94,70		99,72		67,62		6,72
-16	90,71		99,50		87,71		37,26	
-10		94,65		99,66		67,58		6,72
-8	90,80		99,60		87,80		37,30	
0	90,80	94,40	99,60	99,40	87,80	67,40	37,30	6,70
8	90,80		99,60		87,80		37,30	
10		94,56		99,57		67,51		6,71
16	90,89		99,70		87,89		37,34	
20		95,09		100,13		67,89		6,75
24	90,53		99,30		87,54		37,19	
30		95,52		100,58		68,20		6,78
32	89,44		98,11		86,48		36,74	
40		91,80		96,67		65,55		6,52
41	86,99		95,42		84,11		35,73	
43	84,81		93,03		82,01		34,84	
46	79,18		86,85		76,56		32,53	
48	67,83		74,40		65,59		27,86	
50		41,81		44,02		29,85		2,97
51	50,30		55,18		48,64		20,66	
53	31,24		34,26		30,20		12,83	
56	17,16		18,82		16,59		7,05	
58	9,35		10,26		9,04		3,84	
60		8,98		9,45		6,41		0,64
61	5,81		6,37		5,62		2,39	
65	3,27		3,59		3,16		1,34	
69	2,00		2,19		1,93		0,82	
70		3,58		3,77		2,55		0,25
73	1,36		1,49		1,32		0,56	
77	1,18		1,29		1,14		0,48	
80		2,37		2,49		1,69		0,17





(c)



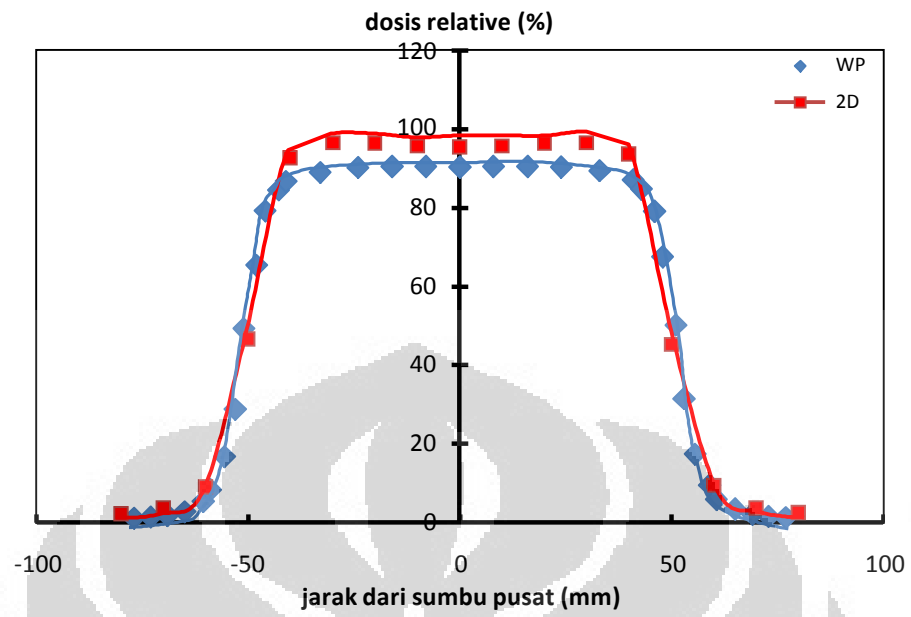
(d)

Perbandingan profil dosis berkas elektron 8 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm, (b) 1,5 cm, (c) 2,5 cm dan (d) 3,5 cm

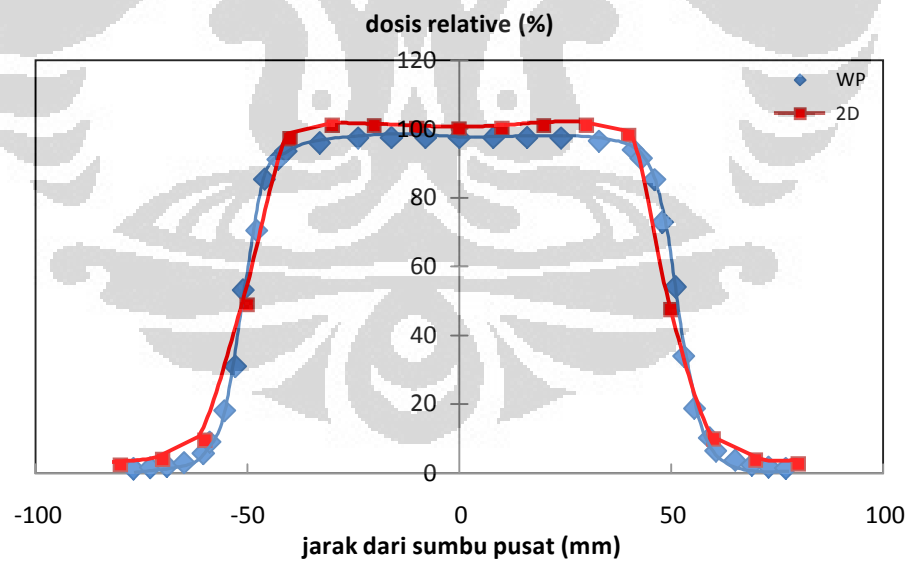
LAMPIRAN 11

Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 10 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

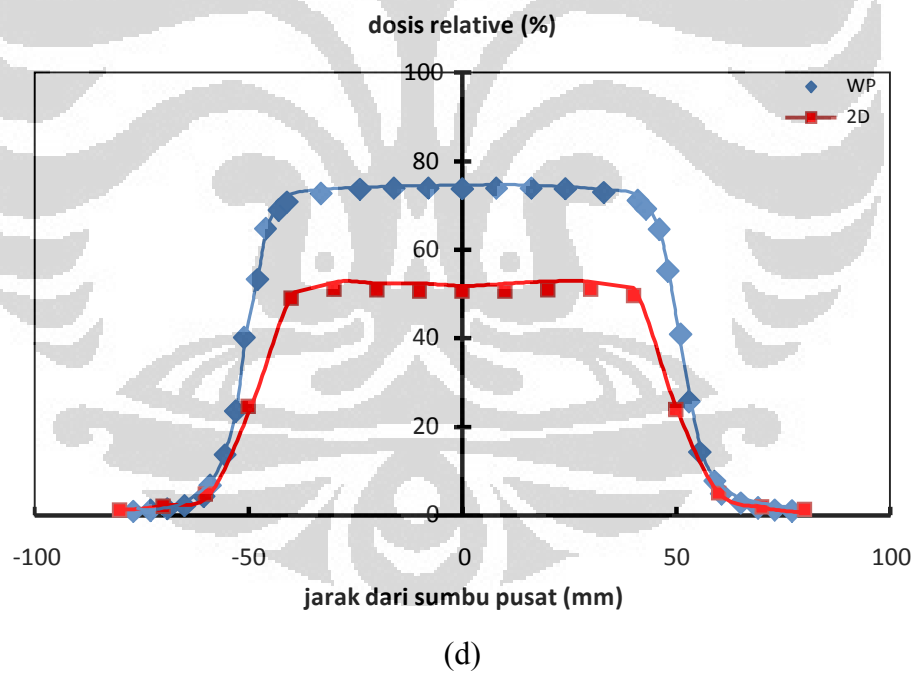
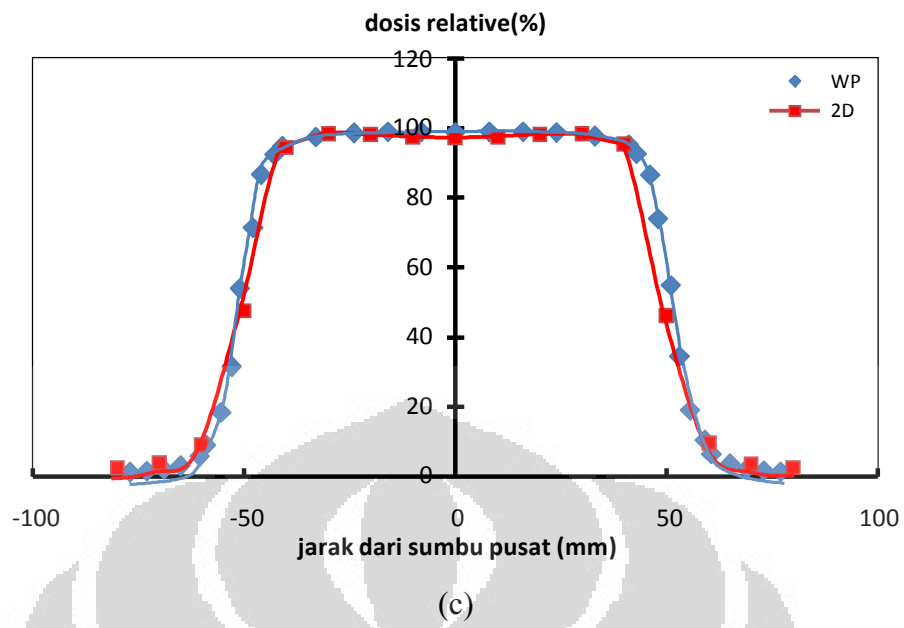
	5 mm		15 mm		25 mm		35 mm	
	WP	2D	WP	2D	WP	2D	WP	2D
-80		2,3		2,4		2,3		1,2
-77	1,18		1,27		1,28		0,96	
-73	1,45		1,56		1,58		1,18	
-70		3,8		4,0		3,9		2,0
-69	1,90		2,05		2,07		1,55	
-65	2,80		3,02		3,06		2,29	
-61	5,33		5,75		5,83		4,35	
-60		9,0		9,4		9,2		4,8
-59	8,32		8,97		9,09		6,79	
-56	16,81		18,14		18,38		13,73	
-53	28,84		31,10		31,52		23,54	
-51	49,27		53,14		53,85		40,22	
-50		46,6		48,8		47,4		24,6
-48	65,36		70,49		71,43		53,36	
-46	79,28		85,51		86,65		64,72	
-43	84,52		91,16		92,38		69,00	
-41	86,69		93,50		94,75		70,77	
-40		92,6		97,1		94,4		49,0
-33	89,04		96,04		97,32		72,69	
-30		96,4		101,0		98,2		51,0
-24	90,22		97,31		98,60		73,65	
-20		96,3		100,9		98,1		51,0
-16	90,49		97,60		98,90		73,87	
-10		95,6		100,2		97,4		50,6
-8	90,49		97,60		98,90		73,87	
0	90,40	95,4	97,50	100,0	98,80	97,2	73,80	50,5
8	90,49		97,60		98,90		73,87	
10		95,6		100,2		97,4		50,6
16	90,49		97,60		98,90		73,87	
20		96,2		100,9		98,1		50,9
24	90,31		97,40		98,70		73,73	
30		96,4		101,1		98,2		51,0
33	89,41		96,43		97,71		72,99	
40		93,6		98,1		95,4		49,6
41	87,15		93,99		95,24		71,14	
43	84,80		91,46		92,67		69,22	
46	79,10		85,31		86,45		64,58	
48	67,62		72,93		73,90		55,20	
50		45,3		47,4		46,1		24,0
51	50,17		54,11		54,83		40,96	
53	31,55		34,03		34,48		25,76	
56	17,45		18,82		19,07		14,24	
59	9,58		10,34		10,47		7,82	
60		9,4		9,9		9,6		5,0
61	5,97		6,44		6,52		4,87	
65	3,44		3,71		3,75		2,80	
69	2,17		2,34		2,37		1,77	
70		3,6		3,8		3,6		1,9
73	1,63		1,76		1,78		1,33	
77	1,27		1,37		1,38		1,03	
80		2,5		2,7		2,6		1,3



(a)



(b)

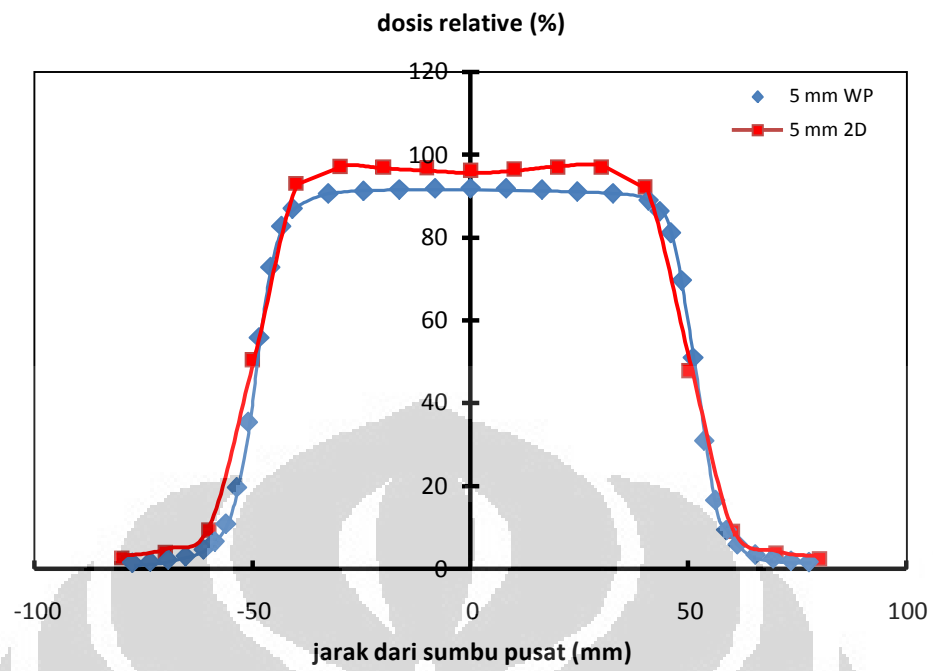


Perbandingan profil dosis berkas elektron 10 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm, (b) 1,5 cm, (c) 2,5 cm dan (d) 3,5 cm

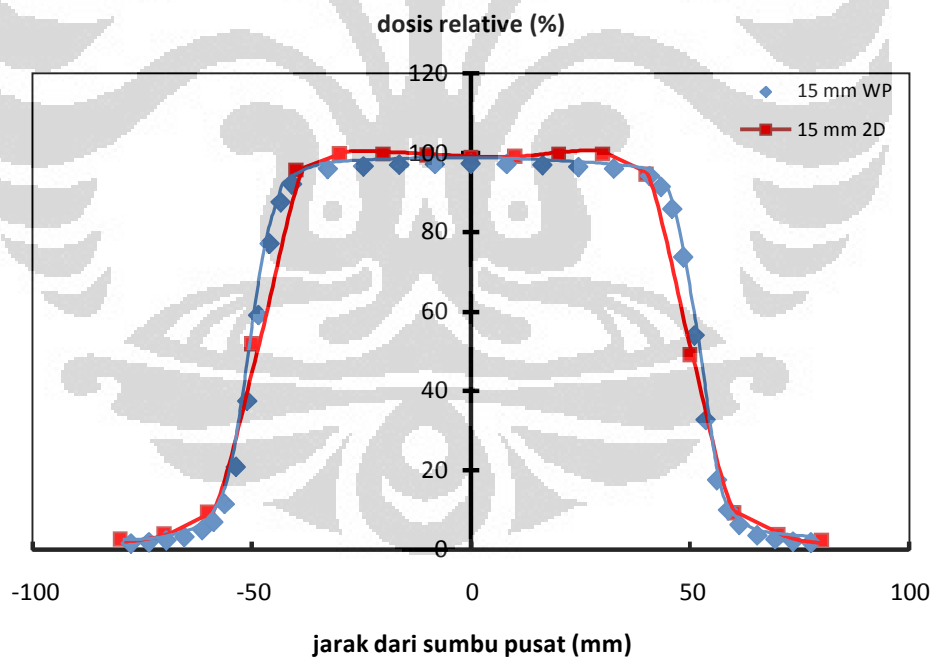
LAMPIRAN 12

Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 12 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

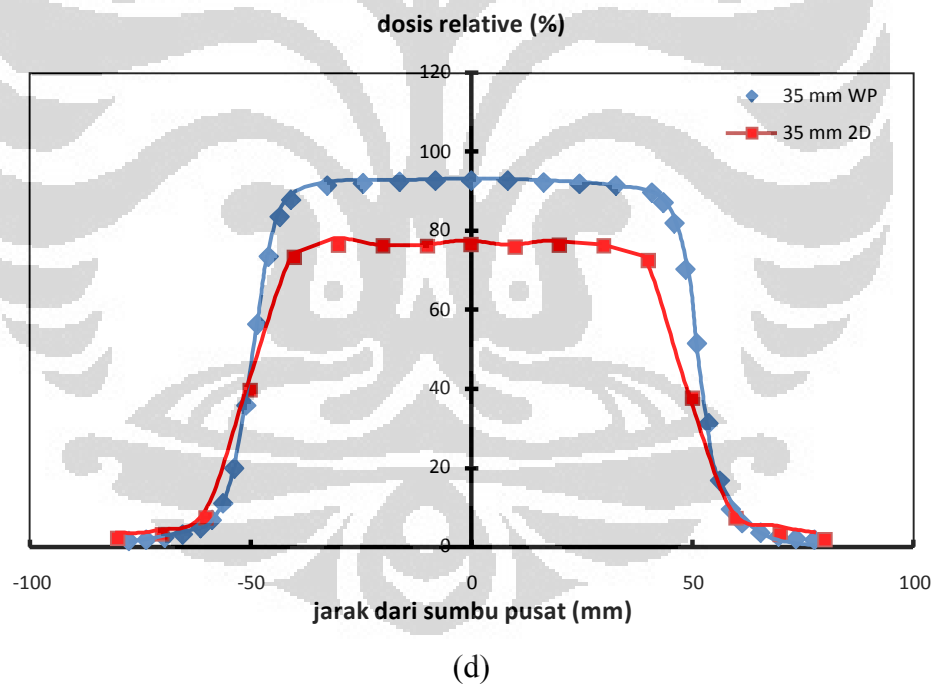
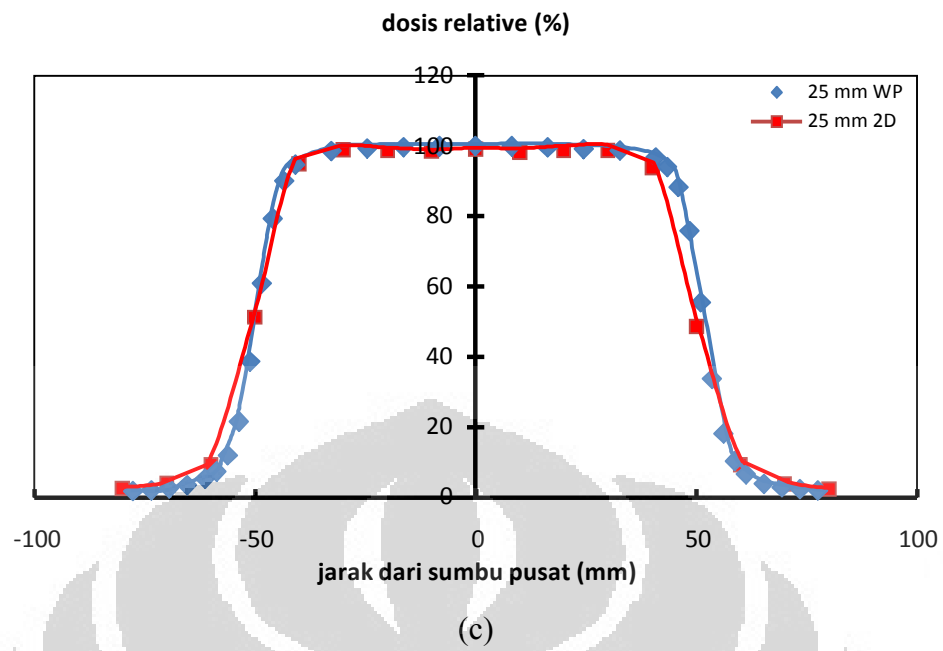
	5 mm		15 mm		25 mm		35 mm	
	WP	2D	WP	2D	WP	2D	WP	2D
-80		2,59		2,66		2,64		2,04
-78	1,56		1,65		1,7		1,58	
-74	1,84		1,94		2,0		1,85	
-70		3,97		4,07		4,04		3,12
-69	2,30		2,43		2,5		2,32	
-65	3,12		3,30		3,4		3,15	
-61	4,78		5,05		5,2		4,82	
-60		9,28		9,53		9,45		7,29
-59	6,71		7,10		7,3		6,77	
-56	10,94		11,57		11,9		11,03	
-54	19,76		20,90		21,5		19,93	
-51	35,47		37,52		38,6		35,78	
-50		50,47		51,83		51,37		39,65
-49	55,88		59,10		60,8		56,36	
-46	72,88		77,08		79,3		73,51	
-43	82,71		87,48		90,0		83,43	
-41	87,03		92,05		94,7		87,79	
-40		93,13		95,65		94,79		73,17
-33	90,61		95,84		98,6		91,40	
-30		97,21		99,84		98,94		76,38
-25	91,26		96,52		99,3		92,05	
-20		97,06		99,68		98,78		76,26
-16	91,62		96,91		99,7		92,42	
-10		96,81		99,42		98,53		76,06
-8	91,81		97,10		99,9		92,61	
0	91,90	96,30	97,20	98,90	100,00	99,10	92,70	76,50
8	91,81		97,10		99,9		92,61	
10		96,55		99,16		98,26		75,86
16	91,53		96,81		99,6		92,33	
20		97,13		99,75		98,85		76,31
25	91,07		96,33		99,1		91,87	
30		97,06		99,68		98,78		76,26
33	90,71		95,94		98,7		91,49	
40		92,15		94,64		93,79		72,40
41	88,96		94,09		96,8		89,73	
43	86,39		91,37		94,0		87,14	
46	81,15		85,83		88,3		81,85	
49	69,66		73,68		75,8		70,27	
50		47,92		49,21		48,77		37,65
51	51,00		53,95		55,5		51,45	
54	30,97		32,76		33,7		31,24	
56	16,63		17,59		18,1		16,78	
59	9,47		10,01		10,3		9,55	
60		9,11		9,36		9,27		7,16
65	3,49		3,69		3,8		3,52	
69	2,57		2,72		2,8		2,60	
70		3,78		3,89		3,85		2,97
74	2,02		2,14		2,2		2,04	
78	1,75		1,85		1,9		1,76	
80		2,39		2,45		2,43		1,88



(a)



(b)



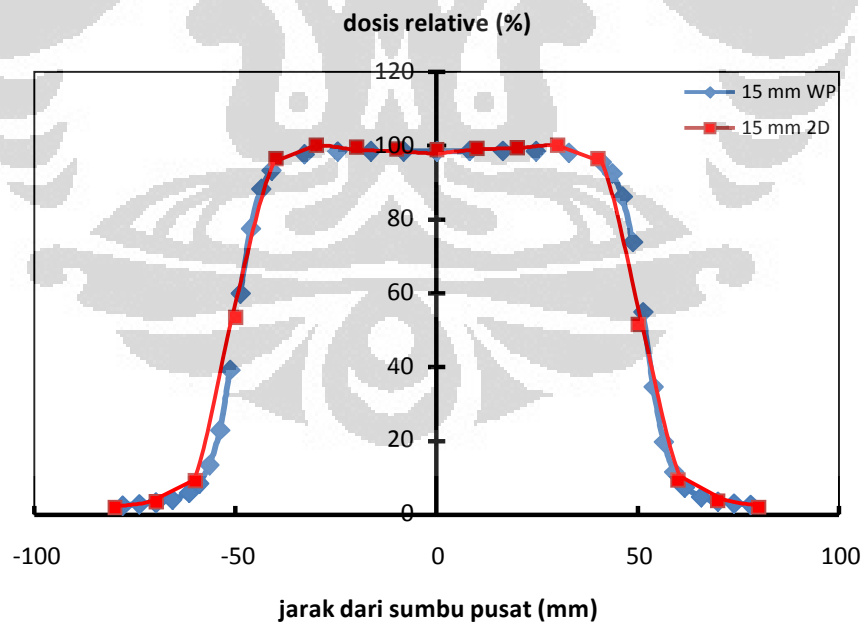
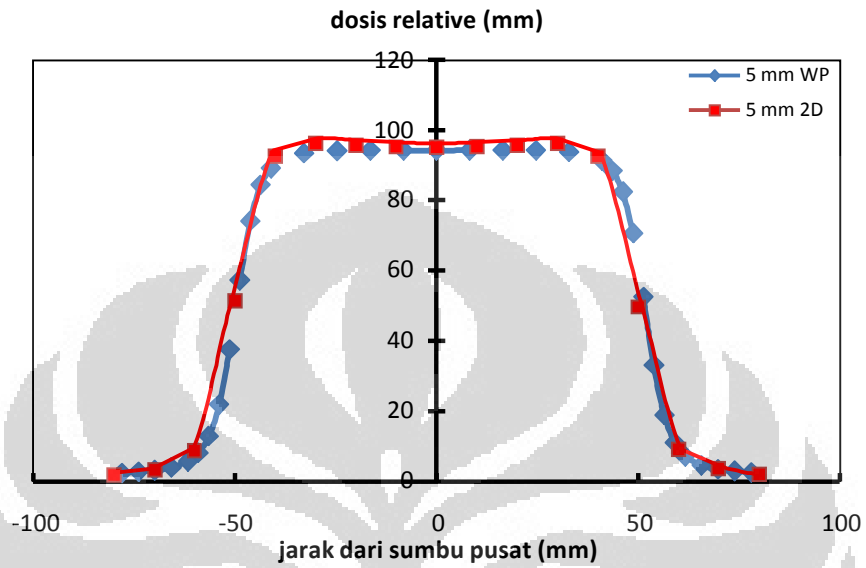
Perbandingan profil dosis berkas elektron 10 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm, (b) 1,5 cm, (c) 2,5 cm dan (d) 3,5 cm

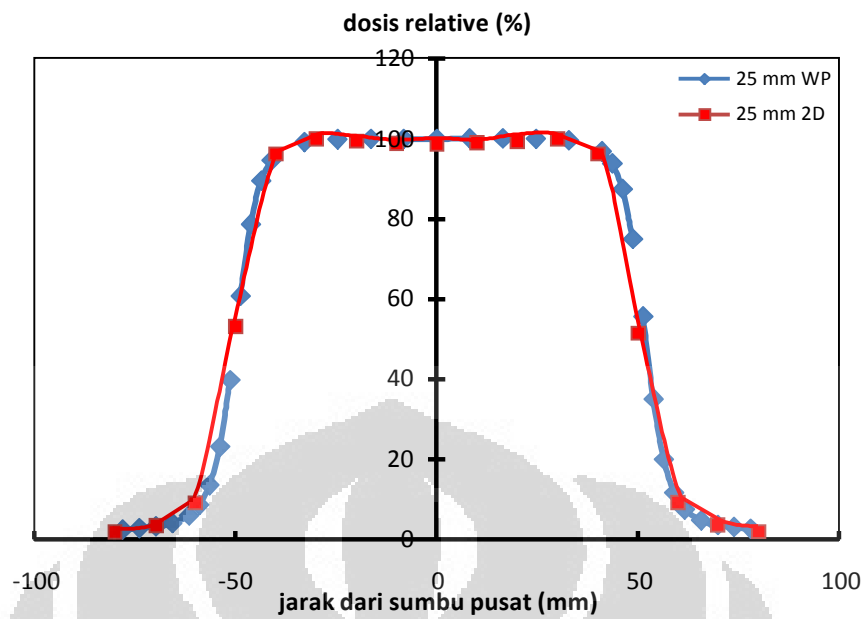
LAMPIRAN 13

Hasil pengukuran profil dosis berkas elektron 15 MeV dengan variasi kedalaman 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 3,5 cm menggunakan detektor matriks (2D) dan fantom air (WP).

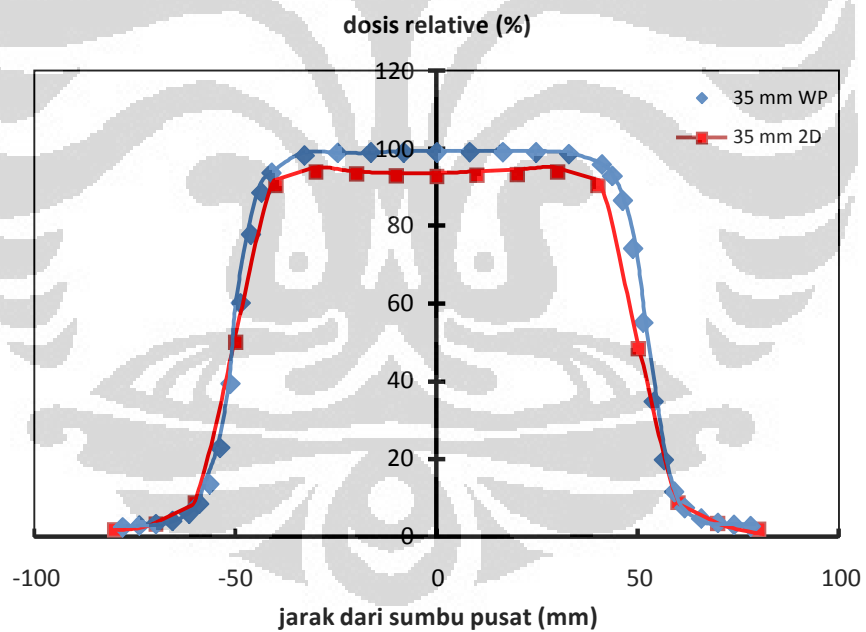
	5 mm		15 mm		25 mm		35 mm	
	WP	2D	WP	2D	WP	2D	WP	2D
-80		1,80		1,87		1,86		1,75
-78	2,36		2,46		2,50		2,47	
-74	2,73		2,85		2,90		2,87	
-70	3,11	3,38	3,25	3,52	3,30	3,51	3,26	3,30
-66	3,86		4,03		4,09		4,05	
-62	5,65		5,90		5,99		5,93	
60		8,82		9,17		9,15		8,61
-59	8,10		8,46		8,59		8,51	
-56	12,81		13,38		13,58		13,45	
-54	21,85		22,83		23,17		22,94	
-51	37,49		39,16		39,74		39,36	
-50		51,34		53,41		53,28		50,13
-49	57,27		59,83		60,71		60,13	
-46	74,14		77,44		78,58		77,83	
-44	84,40		88,17		89,47		88,61	
-41	89,21		93,18		94,56		93,66	
-40		92,63		96,37		96,13		90,44
-33	93,45		97,61		99,05		98,11	
-30		96,23		100,11		99,85		93,95
-25	94,11		98,30		99,75		98,80	
-20		95,74		99,60		99,35		93,47
-16	94,20		98,40		99,85		98,90	
-10		95,23		99,07		98,82		92,97
-8	94,20		98,40		99,85		98,90	
0	94,20	95,01	98,40	98,84	99,85	98,59	98,90	92,76
8	94,29		98,50		99,95		99,00	
10		95,38		99,23		98,97		93,12
16	94,29		98,50		99,95		99,00	
20		95,62		99,47		99,22		93,35
25	94,20		98,40		99,85		98,90	
30		96,28		100,16		99,91		94,00
33	93,82		98,01		99,45		98,50	
40		92,64		96,38		96,14		90,45
41	91,28		95,35		96,75		95,83	
44	88,45		92,40		93,76		92,87	
46	82,43		86,10		87,37		86,54	
49	70,65		73,80		74,89		74,18	
50		49,60		51,60		51,47		48,43
51	52,47		54,81		55,62		55,09	
54	33,06		34,54		35,05		34,71	
56	18,84		19,68		19,97		19,78	
59	11,02		11,51		11,68		11,57	
60		9,03		9,39		9,37		8,81
62	7,07		7,38		7,49		7,42	
66	4,52		4,72		4,79		4,75	
70	3,39	3,54	3,54	3,69	3,59	3,68	3,56	3,46

74	2,92		3,05		3,10		3,07	
78	2,54		2,66		2,70		2,67	
80		1,94		2,02		2,01		1,89





(c)



(d)

Perbandingan profil dosis berkas elektron 15 MeV menggunakan detektor matriks dan fantom air pada kedalaman (a) 0,5 cm, (b) 1,5 cm, (c) 2,5 cm dan (d) 3,5 cm