

**PENGURANGAN KONTAMINASI pada BERKAS RADIASI
GAMMA COBALT 60 dengan
FILTER TEMBAGA dan ALUMINIUM**

Skripsi Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh

Gelar Sarjana Sains

Oleh

Arreta Rei

030302701X



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK**

2008

LEMBAR PERSETUJUAN

**JUDUL : PENGURANGAN KONTAMINASI pada BERKAS RADIASI
GAMMA COBALT 60 dengan FILTER CUPRUM dan
ALUMINIUM**

NAMA : Arreta Rei

NPM : 030302701X

MENYETUJUI,

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Djarwani S. Soejoko

Alimuddin, M.Si

PENGUJI I

PENGUJI II

PENGUJI III

Dr. Musaddiq Musbach

Dwi Seno, M.Si

Heru Prasetyo, M.Si

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanya teruntuk Sang Pencipta dan Pemberi hikmah, Allah SWT atas segala anugrah yang diberikan kepada penulis. Karena hanya dengan izin-Nya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan penelitian dengan judul:

Pengurangan Kontaminasi pada Berkas Radiasi Gamma Cobalt 60 dengan Filter Tembaga dan Aluminium

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Djarwani Soeharso Soejoko sebagai pembimbing I, yang telah menyediakan banyak waktu untuk penulis, membimbing, memotivasi, serta memberikan ilmu dan inspirasi sejak penulis mengenal fisika medis.
2. Mas Alimuddin, M.Si sebagai pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu, ilmu, dan tenaga dalam pelaksanaan penelitian ini. Juga atas segala kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Bapak Dr. Musaddiq Musbach sebagai penguji I yang telah memberikan kritik konstruktif untuk semakin memperbaiki karya ini.
4. Mas Dwi Seno, M.Si sebagai penguji II yang telah memberikan waktu dan masukan-masukan untuk perbaikan skripsi ini.
5. Mas Heru Prasetyo, M.Si yang telah memberikan banyak ilmu baru yang membuka cakrawala berpikir penulis, juga atas masukan-masukan dan revisi.
6. Ibunda Natasha Erwinn yang banyak memberikan dukungan dalam segala bentuk kepada penulis.

7. Adikku tercinta, Marsha Ceniza yang seringkali menjadi hiburan dan motivasi dalam berkarya untuk menjadi yang terbaik.
8. Ayahanda Angka Hendarsan S. atas segala kontribusi yang diberikan kepada penulis selama ini.
9. Mas Supriyanto, M.Si, Bapak Rahmat W. A.(Alm), Bapak Dr. Terry Mart, Bapak Dr. Martarizal, juga seluruh dosen Departemen Fisika UI atas segala keluasan ilmu yang diberikan selama ini.
10. Bapak Parno dan rekan-rekan di Bengkel Mekanik Departemen Fisika UI yang telah banyak membantu dalam pembuatan alat penelitian penulis.
11. Mbak Ratna atas segala informasi, bantuan, dukungan, dan kemudahan yang diberikan kepada penulis baik selama kegiatan perkuliahan, maupun penelitian.
12. Ipz dan Rani sebagai sahabat yang setia dan sabar membantu, menemani, dan memberikan semangat kepada penulis.
13. Rekan-rekan di Fisika 2003, Andes, Erna, Anita, Mely, Podang, Eka, dan kawan-kawan lain atas segala bantuan dan dukungannya selama ini.
14. Adik-adik tersayang di Keputrian SMAN 47 Jakarta yang menjadi motivasi penulis untuk menjadi yang terbaik dan selalu berada pada kebenaran.
15. Teman-teman SMA, kuliah, AFC, dan pengajian yang telah banyak memberikan warna dalam kehidupan penulis hingga sekarang.
16. Tanpa bermaksud melupakan, kepada semua pihak yang telah membantu penulis selama ini.

Semoga amal baik anda semua diridhoi dan diberikan balasan yang berlipat ganda dan selalu mengalir oleh Yang Maha Adil, Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa hasil penelitian ini masih jauh di bawah sempurna, maka diharapkan kritik dan saran konstruktif demi perbaikan penulisan hasil penelitian ini. Penulis berharap skripsi ini dapat diaplikasikan dan bermanfaat bagi perkembangan ilmu di masa mendatang. Terima kasih.



Jakarta, 16 Juni 2008

Arreta Rei

PENGURANGAN KONTAMINASI pada BERKAS RADIASI GAMMA

COBALT 60 dengan FILTER CUPRUM dan ALUMINIUM

(CONTAMINATE REDUCTION of GAMMA COBALT 60 RADIATION BEAM FILTERED by CUPRUM and ALUMINIUM)

Arreta Rei*

Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia

Depok

(Skripsi S1, 45 + xi Halaman, 24 Gambar, 6 Tabel, Tahun 2008)

ABSTRAK

Telah dilakukan usaha pengurangan kontaminasi elektron dan foton energi rendah pada berkas radiasi gamma pesawat teleterapi cobalt 60 FCC-8000F Shinva milik Rumah Sakit Persahabatan. Pengurangan kontaminan dilakukan dengan menambahkan filter efektif, yaitu tembaga 0,4 mm tepat di muka kolimator. Diperoleh peningkatan kedalaman maksimum dari d_{maks} 3,5 mm menjadi 5 mm untuk lapangan radiasi 10x10 cm², 2 mm menjadi 5 mm pada lapangan radiasi 30x30 cm². Untuk lapangan radiasi terkecil (4x4 cm²) tanpa filter, d_{maks} dapat mencapai 5 mm. Telah dicoba juga filter aluminium, dan diperoleh d_{maks} 4,5 mm dengan filter efektif efektif 1 mm. Namun penggunaan filter aluminium tidak memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan filter tembaga.

Kata kunci: daerah build up, d_{maks} , filter efektif

ABSTRACT

Contaminate reduction of electron and photon low energy of cobalt 60 gamma radiation from FCC-8000F Shinva teletherapy unit has been performed at Persahabatan Hospital. By using the effective 0,4 mm copper filter at the end of collimator, the maximum depth (d_{max}) can be raised from 3.5 mm to 5 mm for 10x10 cm² field size, 2 mm to 5 mm for 30x30 cm² field size. At the smallest field size,(4x4 cm²) d_{max} was already 5 mm without filter. Besides copper filter, aluminium filter was also used in this work. It was found 1 mm aluminium as an effective filter. However copper was better than aluminium for filtering contamination of cobalt 60 gamma radiation beam.

Key words: build up area, d_{max} , effective filter

*positron_1106@yahoo.com

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| LEMBAR PENGESAHAN..... | i |
| KATA PENGANTAR..... | ii |
| ABSTRAK..... | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | ix |
| DAFTAR TABEL..... | xi |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.3 Batas Permasalahan..... | 3 |
| 1.4 Sistematika Penulisan..... | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 6 |
| 2.1 Pesawat Teleterapi Cobalt 60..... | 6 |
| 2.2 Bilik Ionisasi dan Elektrometer..... | 9 |
| 2.3 Dosis Serap..... | 11 |
| 2.4 Persentase Dosis Kedalaman (<i>PDD</i>)..... | 12 |
| 2.5 Kontaminasi Elektron..... | 13 |
| 2.6 <i>Efek Skin Sparing</i> | 15 |

| | |
|--|----|
| BAB 3 EKSPERIMEN..... | 16 |
| 3.1 Peralatan Eksperimen..... | 16 |
| 3.2 Metode Eksperimen..... | 19 |
| | |
| BAB 4 HASIL EKSPERIMEN..... | 22 |
| 4.1 Dosis Absorpsi..... | 22 |
| 4.2 $PDD_{(20,10)}$ pada Berbagai Kondisi Pengukuran..... | 23 |
| 4.3 PDD untuk Lapangan Tanpa Filter..... | 24 |
| 4.4 PDD untuk Lapangan dengan Filter Cuprum dan Aluminium..... | 27 |
| | |
| BAB 5 PEMBAHASAN..... | 33 |
| | |
| BAB 6 KESIMPULAN dan SARAN..... | 42 |
| 6.1 Kesimpulan..... | 42 |
| 6.2 Saran..... | 43 |
| | |
| DAFTAR ACUAN..... | 44 |
| | |
| LAMPIRAN | |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Halaman |
|---|---------|
| 2.1 Pesawat teleterapi Cobalt 60..... | 7 |
| 2.2 Bagan model pengeluaran sumber radioaktif..... | 8 |
| 2.3 <i>Pellet</i> Cobalt 60..... | 8 |
| 2.4 Struktur kapsul penyimpan <i>pellet</i> | 8 |
| 2.5 Bilik ionisasi plan paralel..... | 10 |
| 2.6 Pengurangan kontaminasi elektron dengan filter..... | 14 |
| 2.7 Pengaruh kontaminasi elektron terhadap daerah <i>build up</i> | 15 |
| 3.1 Pesawat teleterapi Cobalt 60 FCC-800F Shinva..... | 17 |
| 3.2 Fantom air dengan mikrometer..... | 17 |
| 3.3 Dosimeter Markus..... | 18 |
| 3.4 Elektrometer PTW Unidos..... | 18 |
| 3.5 Filter tembaga..... | 19 |
| 3.6 Filter aluminium..... | 19 |
| 3.7 Pemasangan filter pada kolimator..... | 20 |
| 3.8 Posisi detektor dalam fantom yang dilengkapi mikrometer..... | 21 |
| 3.9 Posisi fantom dan detektor terhadap pesawat teleterapi Cobalt 60..... | 21 |
| 3.10 Skema posisi pengukuran..... | 21 |
| 4.1 Grafik hubungan antara <i>PDD</i> radiasi gamma Cobalt 60 dengan fungsi kedalaman untuk <i>SSD</i> 80 cm dan lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm ² | 26 |
| 4.2 Grafik <i>PDD</i> sebagai fungsi kedalaman dengan berbagai filter Cu untuk lapangan 4x4 cm ² , 10x10 cm ² , 30x30 cm ² | 29 |
| 4.3 Grafik <i>PDD</i> sebagai fungsi kedalaman dengan berbagai filter Al untuk lapangan 4x4 cm ² , 10x10 cm ² , 30x30 cm ² | 31 |
| 5.1 Grafik perbandingan kualitas antara filter Cu dan filter Al dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi 4x4 cm ² , <i>SSD</i> 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit..... | 37 |

- 5.2 Grafik perbandingan kualitas antara filter Cu dan filter Al dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.....38
- 5.3 Grafik perbandingan kualitas filter Al dengan interval ketebalan 0,01 mm dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.....39
- 5.4 Grafik perbandingan kualitas antara filter Cu dan filter Al dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $30 \times 30 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.....40



DAFTAR TABEL

| Tabel | Halaman |
|--|---------|
| 4.1 Dosis Absorpsi dalam air pada kedalaman 2, 5, dan 10 cm untuk lapangan 10x10 cm ² , SSD 80 cm dalam waktu eksposi 10 menit..... | 23 |
| 4.2 $PDD_{(20,10)}$ untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm ² pada kondisi tanpa dan dengan berbagai filter, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit..... | 24 |
| 4.3 PDD pada kedalaman 1 - 8 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm ² tanpa filter, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit..... | 25 |
| 4.4 PDD pada rentang kedalaman 3-8 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm ² dengan filter Cu, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit..... | 28 |
| 4.5 PDD pada rentang kedalaman 3-8 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm ² dengan filter Aluminium, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit..... | 30 |
| 4.6 PDD pada rentang kedalaman 3-8 mm untuk lapangan 10x10 cm ² , SSD 80 cm, filter Al dengan interval 0,01 mm, dan waktu penyinaran 1 menit..... | 32 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak ditemukan sinar-X oleh Roentgen pada 1895 dan radioaktivitas oleh Becquerel pada tahun 1896, aplikasi radiasi selalu mengalami perkembangan dalam rangka pemanfaatannya dalam kehidupan manusia. Pada dunia kesehatan, radiasi saat ini sangat umum dipakai untuk radiodiagnostik dan radioterapi.

Radiasi pengion dimanfaatkan untuk pengobatan penyakit kanker karena diketahui dapat merusak, bahkan mematikan sel hidup. Hal inilah dasar penggunaan radioterapi. Radioterapi memanfaatkan sifat radiosensitifitas sel kanker sel kanker, dimana sel kanker lebih sensitif dibandingkan sel sehat.¹ Oleh karenanya, terapi dengan radiasi merupakan salah satu cara pengobatan kanker yang telah umum digunakan selama ini. Radiasi yang digunakan untuk radioterapi, yaitu radiasi elektron dan foton. Radiasi elektron dihasilkan dari pesawat teleterapi sinar-X dan LINAC (Linear Accelerator), sedangkan radiasi foton dihasilkan oleh pesawat teleterapi Cobalt 60.

Perlakuan radioterapi difokuskan pada pemberian dosis radiasi tinggi untuk jaringan kanker, namun dosis rendah pada jaringan normal. Salah satu faktor yang menentukan keberhasilan radioterapi adalah posisi peralatan dan ketelitian pengukuran. Parameter yang biasa digunakan untuk penentuan distribusi dosis di kedalaman tubuh adalah besaran *PDD* (Percentage Depth

Dose) atau Persentase Dosis Kedalaman. *PDD* merupakan hasil normalisasi persentase distribusi dosis pada sumbu utama penyinaran pada tubuh atau fantom terhadap nilai dosis maksimum D_{max} , yang bernilai 100% pada suatu kedalaman, d_{max} .² Dengan kata lain, *PDD* merupakan distribusi dosis pada sumbu utama penyinaran di dalam tubuh pasien atau fantom.

Dari hasil pengukuran pesawat Cobalt 60 FCC-8000F Shinva pada Rumah Sakit Persahabatan, diperoleh informasi bahwa *PDD* dengan $d_{maks} = 4$ mm. Padahal seharusnya untuk pesawat Cobalt 60, juga dari manual pesawat ini sendiri, $d_{maks} = 5$ mm. Ini berarti pada kedalaman tubuh 4 mm akan memperoleh dosis maksimum. Pergeseran konsentrasi dosis ini akan menurunkan *efek skin sparing* dan memperbesar dosis pada kulit. Hal ini dapat memperparah kerusakan pada kulit. Diperkirakan penyebab pergeseran d_{maks} tersebut adalah adanya kontaminasi elektron maupun foton yang berasal dari tumbukan dengan kolimator, kepala pesawat, dan udara.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah melakukan usaha pengurangan kontaminasi elektron dan foton energi rendah dengan menggunakan filter tembaga (Cu) dan aluminium (Al) dengan ketebalan yang bervariasi. Filter Cu dan Al yang dipasang pada kolimator diharapkan dapat menahan energi rendah yang akan mengkontaminasi berkas radiasi, sehingga hanyalah energi tinggi Cobalt 60 yang akan sampai ke tubuh pasien. Dengan begitu akan diperoleh $d_{maks} = 5$ mm. Penggunaan filter Cu dan Al akan dilakukan untuk pengukuran *PDD* terhadap lapangan radiasi 4x4, 10x10, dan 30x30 cm².

1.3 Batasan Permasalahan

Penelitian mengenai kualitas berkas radiasi gamma ini dilakukan terhadap pesawat Cobalt 60 FCC-8000F Shinva milik Instalasi Radioterapi Rumah Sakit Persahabatan.

Pengukuran untuk daerah *build up* dilakukan pada kedalaman 3-8 mm dengan rentang 0,1 mm, sedangkan untuk pengukuran di luar daerah *build up* dilakukan pada kedalaman 2, 5, 10, dan 20 cm.

Perbandingan tingkat kontaminasi terhadap luas lapangan, diamati pada lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm².

Untuk mengurangi kontaminan, digunakan filter Cu berketebalan 0,3-0,5 mm dengan rentang 0,1 mm dan Al 0,8-1,2 mm dengan rentang 0,2 mm. Khusus untuk lapangan radiasi 10x10 cm², digunakan filter Al dengan interval ketebalan 0,01 mm. Analisa dilakukan dengan membandingkan *PDD* hasil pengukuran.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika karya tulis ini dibagi menjadi 6 bab pokok pembahasan yang meliputi:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan permasalahan, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai teori-teori penunjang penelitian, antara lain mengenai alata-alat yang digunakan dan teori dasar dari permasalahan yang dibahas.

BAB 3 EKSPERIMEN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai fantom yang dibuat untuk penelitian ini. Selain itu, posisi dan cara kerja peralatan yang digunakan dalam pengukuran dan pengambilan data.

BAB 4 HASIL EKSPERIMEN

Pada bab ini akan ditunjukkan *PDD* dari pengukuran yang telah dilakukan, baik untuk daerah *build up*, maupun di luar daerah *build up* untuk berbagai kondisi pengukuran.

BAB 5 PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibandingkan hasil dari berbagai kondisi pengukuran yang dilakukan. Fenomena-fenomena yang terjadi pun akan dianalisa pada bab ini, sehingga memberikan hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian.

BAB 6 KESIMPULAN

Dalam bab ini, penulis akan memberikan beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini, serta saran lebih lanjut untuk aplikasi dari penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pesawat Teleterapi Cobalt 60

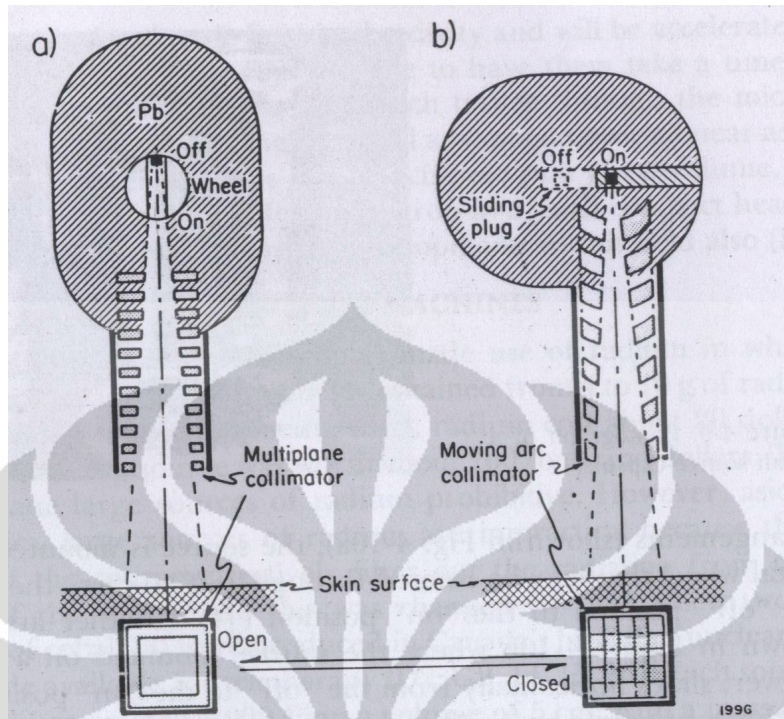
Pada tahun 1951 diproduksi untuk pertama kalinya dua sumber Cobalt 60 pada suatu reaktor nuklir di Kanada. Sumber ini yang menjadi cikal bakal pemanfaatan Cobalt 60 untuk radioisotop teleterapi, menggantikan radioisotop Radium. Keuntungan Cobalt 60, diantaranya adalah memiliki aktivitas yang cukup tinggi ($\approx 200 \text{ Ci/g}$)², paparannya besar dan kontinu dengan dua puncak energi, yaitu 1,3 dan 1,7 MeV. Dalam penggunaannya, Cobalt 60 memberikan dosis yang kecil pada permukaan tubuh atau fantom, dan dosis maksimum pada kedalaman di bawah permukaan tubuh atau fantom.³ Namun di samping itu, terdapat beberapa kelemahan, yaitu penumbra yang cenderung besar, diperlukan pemeriksaan bulanan untuk mengetahui peluruhannya, sumber harus diganti setiap lima tahun, serta energi outputnya monoton.



Gambar 2.1. Pesawat Teleterapi cobalt 60

Badan pesawat teleterapi Cobalt 60 terbuat dari *container* baja dengan selubung timbal. Di sekitar bagian tengah kepalanya tersimpan sumber Cobalt 60 dan *source device* yang mengatur posisi sumber jika akan digunakan. Pesawat teleterapi Cobalt 60, yang operasi dan perawatannya relatif lebih mudah dan efisien dibanding pesawat teleterapi elektron ini, juga memiliki cara kerja yang lebih sederhana. Untuk memaparkan radiasi, pesawat teleterapi Cobalt 60 hanya dengan membuka kolimator pada ukuran tertentu bergantung pada luas lapangan radiasinya. *Device source* digerakkan hingga sumber mengarah dan mendekat ke bukaan kolimator.² Tidak diperlukan pembangkit listrik untuk stimulasi paparan, juga tidak diperlukan pemercepat partikel. Cara pengeluaran sumber dapat dilakukan dengan beberapa cara seperti pada gambar 2.2.

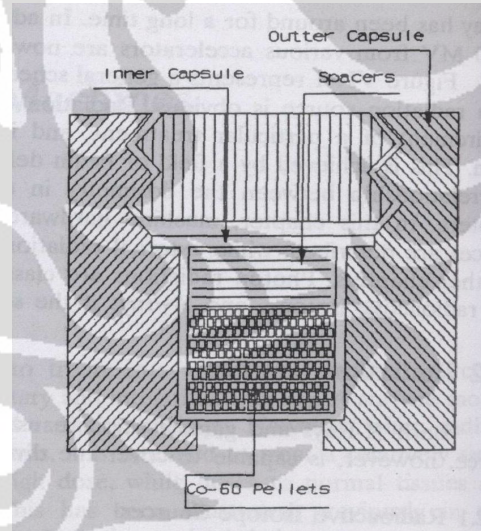
Radioisotop Cobalt 60 yang berupa *pellet* tersimpan dalam kapsul dengan struktur yang terstandarisasi.



Gambar 2.2. Bagan model pengeluaran sumber radioaktif.



Gambar 2.3. Pellet Cobalt 60.



Gambar 2.4. Struktur kapsul penyimpan pellet.

Lapangan radiasi memiliki luasan dari 4×4 – 35×35 cm². Penentuan luas lapangan paparan dari pesawat teleterapi Cobalt 60 dilakukan dengan mengatur bukaan kolimator seperti pada gambar 2.2, dimana kolimator berfungsi sebagai pembentuk

berkas radiasi pesawat teleterapi Cobalt 60. Berkas radiasi yang terbentuk tidak mungkin hanya berbentuk kerucut sempurna. Hal ini dikarenakan bentuk sumber bukan berupa titik dengan diameter sangat kecil (≈ 0). Diameter kapsul penyimpan sumber radioaktif umumnya rentang 1-2 cm, tinggi kapsul $\pm 2,5$ cm.⁵

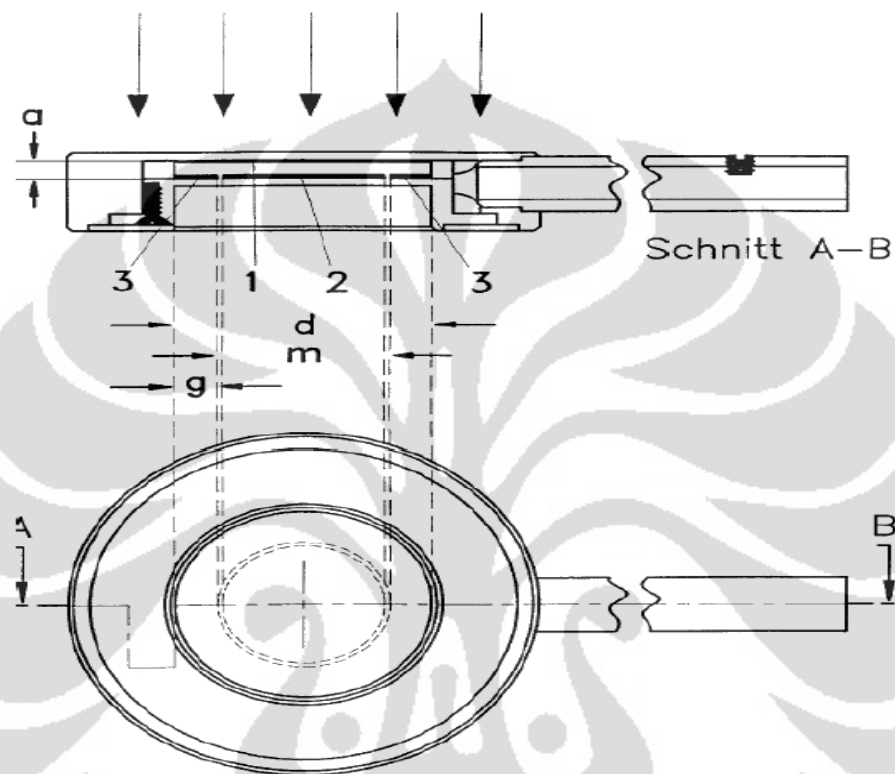
Berkas radiasi akan membentuk penumbra yang akan mengganggu berkas primer radiasi. Penumbra dapat diatasi dengan mengganti sumber dengan yang berdiameter kecil. Langkah ini akan beresiko menurunkan kekuatan paparan energinya. Cara lain adalah dengan menggunakan *trimmer* (pemotong) penumbra.

2.2. Bilik Ionisasi dan Elektrometer

Dalam penelitian ini digunakan detector Markus tipe TM sebagai bilik ionisasi karena dapat mengukur volume sensitif sampai $0,02 \text{ cm}^3$. Hal ini sesuai dengan kebutuhan pengukuran, yaitu untuk mengukur distribusi dosis luasan yang kecil (posisi isocenter) pada kedalaman. Volume detector yang kecil dan sensitif membuat bilik ionisasi ini ideal untuk pengukuran distribusi dosis pada fantom air, dan memberikan resolusi spasial yang baik. Bilik ionisasi ini dindingnya terbuat dari CH_2 Poliethylene setebal 0,03 mm. Terdapat cover akrilik 0,87 mm untuk memproteksi penggunaan dalam air membuat bilik ionisasi Markus menjadi pilihan yang efektif dalam penelitian ini. Cover akrilik ini setara dengan kedalaman pada air 1 mm sehingga dalam pengukuran di kedalaman, semua kedalaman ditambah 1 mm dari detektor yang ditunjukkan fantom.⁷ Kemampuan mencacah waktunya untuk tegangan yang dipakai 300V adalah hingga 22 μ sekon, dengan rentang energi yang bisa diukur 2-45 MeV.⁸

Bilik ionisasi tipe plan parallel ini dapat menghilangkan efek perturbasi dalam pengukuran.⁹

Elektrometer yang digunakan untuk mencacah ionisasi dari bilik ionisasi dalam bentuk muatan dalam penelitian ini adalah PTW tipe Unidos dengan tegangan masukan DC 300V.



Gambar 2.5. Bilik ionisasi plan paralel. (1) elektroda polarisator; (2) elektroda pengukur; (3) ring penjaga. (a) tinggi rongga udara (pemisah elektroda); (d) diameter elektroda polarisator; (m) diameter elektroda pengumpul; (g) lebar ring penjaga.¹⁰

2.3. Dosis Serap

Dosis serap adalah kuantitas energi yang diserap setiap unit massa dalam volum terbatas pada radiasi pengion secara langsung maupun tidak.

$$D = \frac{E_{ab}}{m}$$

Radiasi pengion terjadi secara langsung jika partikel dari sumber tidak bertumbukan dengan partikel-partikel sekunder sebelum menumbuk tubuh atau fantom. Sedangkan radiasi pengion secara tidak langsung, jika terjadi dalam dua tahap. Tahap pertama, radiasi pengion mentransfer energi dalam bentuk energi kinetik kepada partikel sekunder yang bermuatan. Pada tahap ini menghasilkan Kerma. Pada tahap kedua, partikel sekunder bermuatan ini mentransfer sebagian energi kinetiknya kepada tubuh atau fantom, menghasilkan dosis serap.⁶ Dosis serap total merupakan jumlah dari kontribusi dosis berkas primer dan hamburan dari berkas primer.⁵ Hamburan berkas primer terjadi akibat interaksi berkas primer dengan aksesoris-aksesori pada kepala pesawat, juga interaksi berkas primer dengan medium. Satuan dari dosis serap adalah joule per kilogram. Secara khusus, satuan dosis serap adalah gray (Gy), dimana 1 Gy = 1 J/kg.

2.4. Persentase Dosis Kedalaman

Persentase Dosis Kedalaman atau biasa disebut *PDD* merupakan hasil normalisasi persentase distribusi dosis pada sumbu utama penyinaran pada tubuh atau fantom terhadap nilai dosis maksimum D_{\max} , yang bernilai 100% pada suatu kedalaman, d_{\max} .²⁻³

$$PDD = \frac{D(Q)}{D(P)} \times 100 = \frac{\dot{D}(Q)}{\dot{D}(P)} \times 100$$

dengan : $D(Q)$ adalah dosis pada titik Q di kedalaman d_{\max} yang terletak sepanjang sumbu utama penyinaran.

$D(P)$ adalah dosis pada titik P di kedalaman d_{\max} yang terletak sepanjang sumbu utama penyinaran.

$\dot{D}(Q)$ adalah laju dosis pada titik Q di kedalaman d_{\max} yang terletak sepanjang sumbu utama penyinaran.

$\dot{D}(P)$ adalah laju dosis pada titik P di kedalaman d_{\max} yang terletak sepanjang sumbu utama penyinaran.

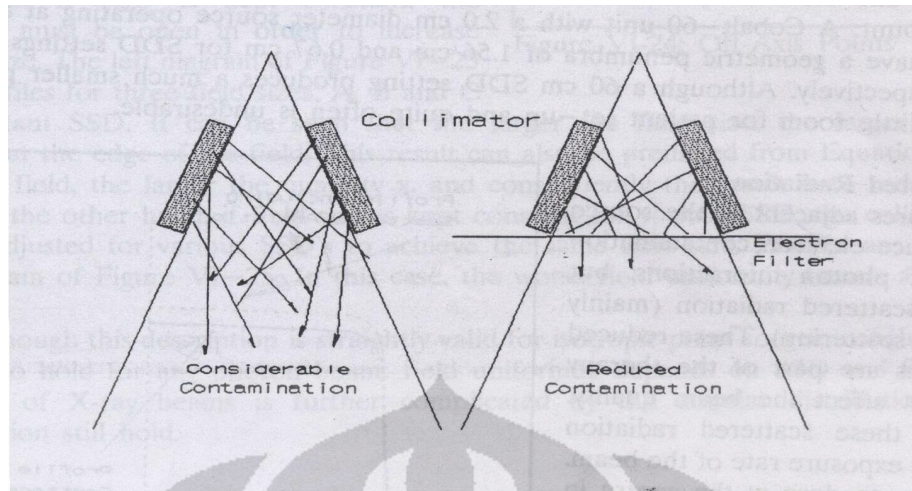
Untuk *PDD*, dosis dapat berupa dosis absolut, maupun dosis relatif, dengan syarat penggunaannya konsisten. Hal ini dikarenakan, inti dari *PDD* adalah perbandingan dosis pada kedalaman yang berbeda.

2.5. Kontaminasi Elektron

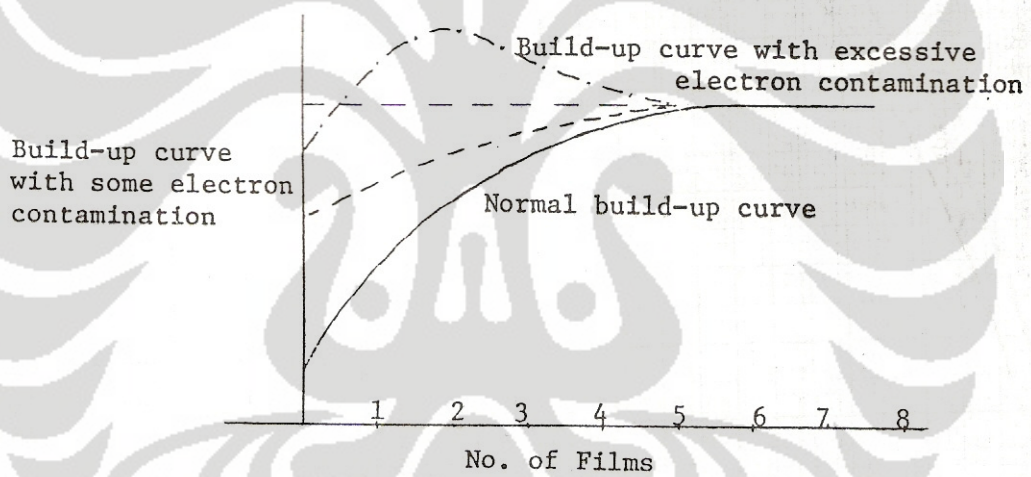
Interaksi foton dengan bagian-bagian pesawat pada kepala, contohnya kolimator, *jaw*, dan *primary definer* akan menghasilkan elektron yang kemudian akan mengkontaminasi berkas fotonnya. Hal ini mengakibatkan berkas radiasi keluaran pesawat teleterapi tidak murni berupa foton, tetapi bercampur dengan elektron. Disebut juga efek kontaminasi elektron.

Kontaminasi elektron menambahkan energi pada berkas sehingga mengecilnya daerah *build up*, yaitu bagian awal dari kenaikan dosis pada kurva dosis kedalaman.⁶ Mengecilnya daerah *build up* berakibat meningkatnya dosis pada permukaan tubuh atau fantom.

Kontaminasi elektron dapat diatasi dengan dua metode, yang pertama adalah dengan menggunakan filter elektron yang diselipkan di bawah kolimator. Filter elektron ini akan menyerap elektron. Walaupun begitu, filter ini juga akan memproduksi elektron akibat tumbukannya, yang akan diteruskan ke berkas foton, sehingga juga terjadi kontaminasi. Untuk menghindari hal tersebut, digunakan bahan filter dengan nomor atom yang cukup besar, sekitar 50. Filter dengan nomor atom demikian akan memproduksi elektron yang diteruskan pada arah berlawanan dengan berkas foton sehingga tidak menambah kontaminasi elektron. Bahan yang biasa dipakai perak ($Z = 47$), timah ($Z = 50$). Tembaga juga biasa dipakai walaupun nomor atomnya 29 karena harganya yang cukup murah, dan dari eksperimen-eksperimen yang dilakukan, memberikan hasil yang memuaskan. Metode kedua, menggunakan udara sebagai material penyerap elektron. Cara ini dilakukan dengan mengatur jarak antara tubuh atau fantom dengan sumber kontaminasi elektron.³



Gambar 2.6. Kontaminasi elektron dan pengurangan kontaminasi elektron dengan filter.



Gambar 2.7. Pengaruh kontaminasi elektron terhadap daerah *build up*.

2.6. Efek Skin Sparing

Terapi dengan foton akan memberikan dosis yang kecil pada permukaan, namun dosis besar dan dosis maksimum pada kedalaman di bawah permukaan. Dengan begitu konsekuensi dari dosis besar tidak terjadi pada kulit. Ini disebut *efek skin sparing*.

Penurunan *efek skin sparing* dapat terjadi jika daerah *build up*-nya mengecil, yang mungkin diakibatkan oleh kontaminasi elektron pada berkas, dan penggunaan lapangan radiasi yang besar. Penurunan *efek skin sparing* akan meningkatkan dosis pada permukaan tubuh atau fantom sehingga kerusakan pada kulit akan meningkat.

Dosis ambang resiko kulit yang teringan, yaitu erithema akibat paparan radiasi adalah 1 Gy. Erythema akan muncul setelah 1-2 hari pemberian dosis 1 Gy, dan akan berlangsung dalam beberapa hari. Dosis > 1 Gy akan menghasilkan erythema yang lebih cepat dan parah.

Dalam beberapa minggu (sekitar minggu ke-3), kulit akan mengalami respon maksimal, ditandai dengan memerah, kering, dan terasa seperti terbakar. Pemberian dosis secara fraksinasi dalam beberapa minggu, dengan dosis sekitar 15-30 Gy akan mengakibatkan deskuamasi kering. Setelah dosis mencapai sekitar 40 Gy yang diberikann dengan fraksinasi selama ± 4 minggu, erythema yang lebih parah akan muncul diikuti dermatitis serta deskuamasi lembab, kemudian berpotensi besar mengalami edema, dermal hypoplasia dan kehilangan rambut permanen.¹

BAB 3

EKSPERIMEN

3.1. Peralatan Eksperimen

Dalam penelitian ini digunakan pesawat Cobalt 60 FCC-8000F Shinva (gambar 3.1) milik Rumah Sakit Persahabatan. Untuk pengukuran dosis relatif dan *PDD* di luar daerah *build up* digunakan fantom air dan detektor Farmer. Selanjutnya untuk pengukuran *PDD* pada daerah *build up* digunakan fantom air yang dilengkapi dengan mikrometer. Fantom air bermikrometer yang dapat dilihat pada gambar 3.2 sengaja dibuat untuk penelitian ini, dimana difungsikan untuk mengukur dosis pada kedalaman. Fantom berbahan akrilik dengan tebal 2 cm ini, berukuran 40 x 40 x 40 cm³, dan dilengkapi dengan dua buah ulir di kedua sisinya. Dua buah ulir ini berfungsi untuk menopang dudukan detektor, juga sebagai pengatur posisi kedalaman detektor. Satu putaran ulir (360°) akan menaikkan atau menurunkan dudukan detektor sebesar 1 mm. Dudukan detektor dibuat khusus untuk detektor Markus. Pada kedua sisi fantom yang berulir, ditambahkan mistar untuk menjaga kepresisian posisi detektor pada suatu kedalaman tertentu. Untuk dosimeter, digunakan detektor Markus tipe TM (gambar 3.3) dan elektrometer PTW Unidos (gambar 3.4). Di samping itu juga digunakan filter tembaga (Cu) dengan ketebalan 0,3 mm, 0,4 mm, dan 0,5 mm; filter aluminium (Al) dengan ketebalan 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm, dan tambahan lapisan Al dengan ketebalan 0,01-0,06 mm.



Gambar 3.1 Pesawat teleterapi Cobalt 60 FCC-8000F Shinva.



Gambar 3.2. Fantom air dengan mikrometer.



Gambar 3.3. Dosimeter Markus



Gambar 3.4. Elektrometer PTW Unidos



Gambar 3.5. Filter tembaga



Gambar 3.6. Filter aluminium

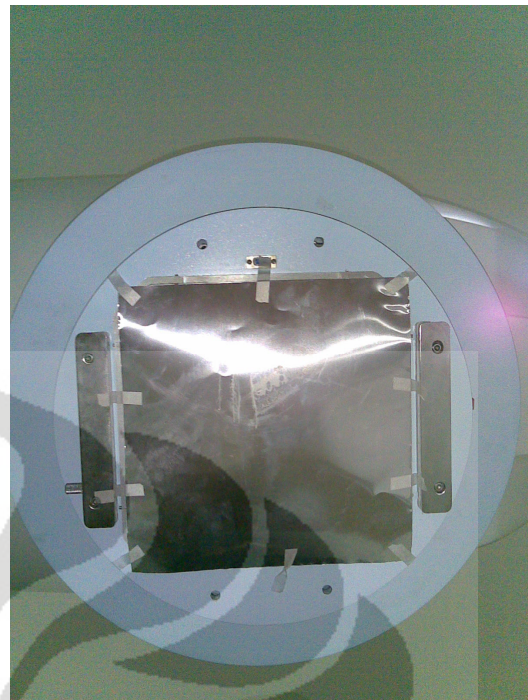
3.2. Metode Eksperimen

Pertama kali dilakukan pengukuran dosis relatif pada kedalaman 2, 5, dan 10 cm, dengan menggunakan detektor Farmer. Kondisi pengukuran yang dipakai, menggunakan luas lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $SSD = 80 \text{ cm}$, dan waktu paparan 10 menit. Selanjutnya pengukuran untuk daerah *build up* dilakukan dengan fantom air beserta mikrometer dan detektor Markus dengan luas lapangan radiasi 4×4 , 10×10 , dan $30 \times 30 \text{ cm}^2$ dalam waktu eksposi 1 menit (Gambar 3.8 dan 3.9). Setiap variasi lapangan dilakukan tiga kali ulangan pengukuran.

Pengukuran berikutnya dilakukan seperti pada pengukuran *PDD* pada daerah *build up*, namun dengan menambahkan filter tepat di bawah kolimator. Pemasangan filter seperti yang ditunjukkan gambar 3.7. Bahan filter adalah Cu dengan rentang ketebalan 0,3, 0,4 dan 0,5 mm, dan Al dengan ketebalan 0,8, 1, dan 1,2 mm. Pengukuran dengan setiap filter untuk setiap lapangan dilakukan dengan ulangan tiga kali.



(a)



(b)

Gambar 3.7. Pemasangan filter pada kolimator. Tampak samping (a). Tampak depan (b)

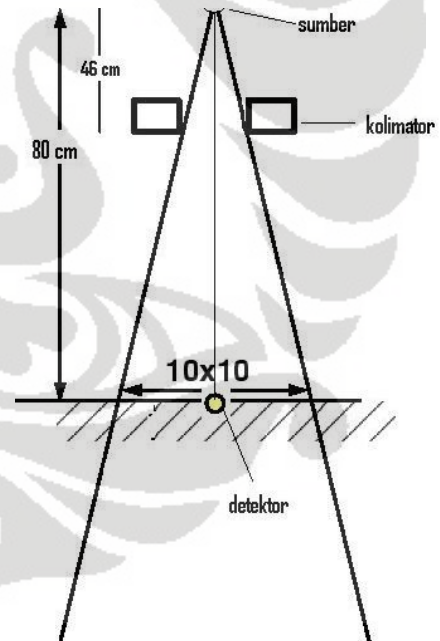
Untuk perubahan kedalaman dengan ukuran millimeter, digunakan mikrometer yang diatur secara manual dengan sistem dua ulir untuk mengatur gerakan posisi detektor vertikal ke atas dan ke bawah.



Gambar 3.8. Posisi detektor dalam fantom yang dilengkapi mikrometer.



Gambar 3.9. Posisi fantom dan detektor terhadap pesawat teleterapi Co-60.



Gambar 3.10. Skema posisi pengukuran

BAB 4

HASIL EKSPERIMEN

4.1 Dosis Absorpsi

Pertama kali dilakukan pengukuran dosis absorpsi pada berbagai kedalaman setelah melewati kedalaman maksimal. Telah dipilih kedalaman 2, 5, dan 10 cm dengan tujuan untuk mengetahui secara tepat kualitas radiasi. Hasil pengukuran dapat dilihat dalam tabel 4.1.

Dosis serap diperoleh dari perhitungan dengan persamaan:

$$D_w(p_{eff}) = M_u N_D (S_{w,air})_u P_u^4$$

dengan: M_u = bacaan electrometer terhadap pengukuran ionisasi selama 10 menit (nC)

N_D = faktor kalibrasi bilik ionisasi untuk dosis serap.

$(S_{w,air})_u$ = rasio *stopping power* air ke udara.

p_u = faktor koreksi perturbasi.

Dengan mengandaikan dosis pada kedalaman 5 cm sesuai dengan 78,5%², diperoleh persentase dosis kedalaman pada 2 dan 10 cm tidak jauh berbeda dengan dosis persentase dosis kedalaman yang diperoleh dari literatur.

Tabel 4.1. Dosis Absorpsi dalam air pada kedalaman 2, 5, dan 10 cm untuk lapangan 10x10 cm², SSD 80 cm dalam waktu eksposi 10 menit.

| d (cm) | D_w (cGy) | $PDD^{[2]}$ | PDD kalkulasi |
|----------|-------------|-------------|-----------------|
| 2 | 207,58 | 93,3 | 93,6 |
| 5 | 174,06 | 78,5 | 78,5 |
| 10 | 123,77 | 55,6 | 55,8 |

4.2 $PDD_{(20,10)}$ pada Berbagai Kondisi Pengukuran

Pengamatan terhadap berkas radiasi di luar daerah *build up* juga dilakukan dengan mengukur ionsasi pada kedalaman 10 dan 20 cm. Dengan begitu dapat diperoleh $PDD_{(20,10)}$ yang terdapat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. $PDD_{(20,10)}$ untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm² pada kondisi tanpa dan dengan berbagai filter, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

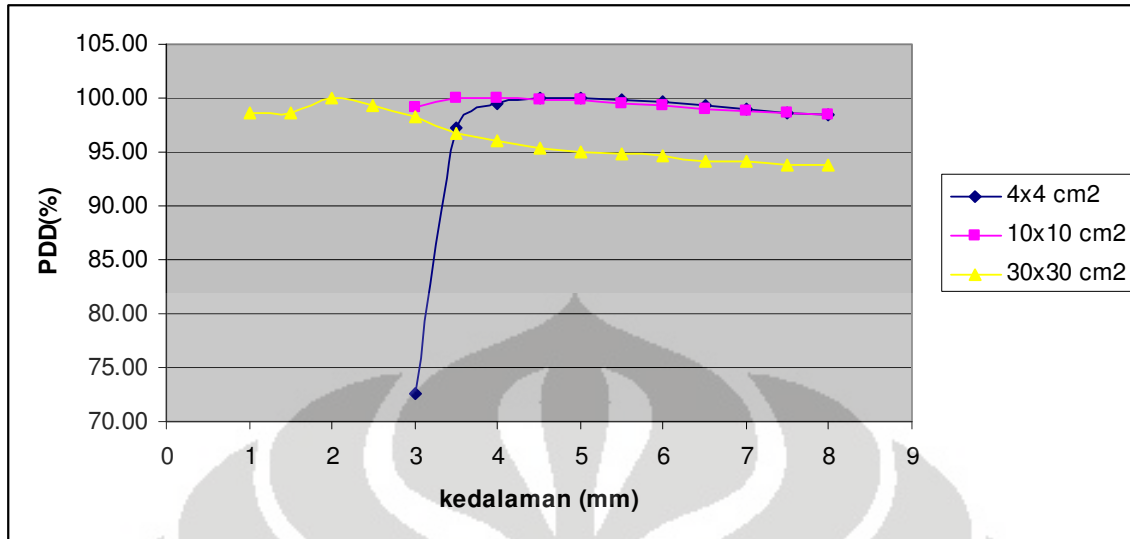
| Filter Lap | $PDD_{(20,10)}$ | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|
| | $PDD_{(20,10)}^{[2]}$ | Tanpa Filter | Cu 0,3 mm | Cu 0,4 mm | Cu 0,5 mm | Al 0,8 mm | Al 1 mm | Al 1,2 mm |
| 4x4 | 0,448 | 0,443 | 0,444 | 0,444 | 0,444 | 0,444 | 0,548 | 0,443 |
| 10x10 | 0,489 | 0,483 | 0,483 | 0,483 | 0,483 | 0,483 | 0,483 | 0,483 |
| 30x30 | - | 0,549 | 0,550 | 0,548 | 0,549 | 0,550 | 0,548 | 0,549 |

4.3 PDD untuk Lapangan Tanpa Filter

Dalam penelitian ini, pengukuran difokuskan pada kedalaman yang lebih rendah dari 2 cm, terutama di daerah sekitar kedalaman maksimal. Untuk mengetahui keberadaan kontaminasi awal pengukuran PDD dilakukan dalam kondisi lapangan terbuka, tanpa filter. Hasil pengukuran dengan lapangan terbuka dapat dilihat dalam lampiran 2, sedangkan nilai PDD dapat dilihat pada tabel 4.3, dan grafiknya pada gambar 4.1.

Tabel 4.3. *PDD* pada kedalaman 1 - 8 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm² tanpa filter, *SSD* 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

| <i>d</i> (mm) | <i>PDD</i> (%) | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 4 x 4 cm ² | 10 x 10 cm ² | 30 x 30 cm ² |
| 1 | - | - | 98.6 |
| 1,5 | - | - | 98.6 |
| 2 | - | - | 100 |
| 2,5 | - | - | 99.4 |
| 3 | 72.5 | 99.1 | 98.2 |
| 3,5 | 97.19 | 100 | 96.8 |
| 4 | 99.5 | 99.9 | 96.1 |
| 4,5 | 99.9 | 99.8 | 95.3 |
| 5 | 100 | 99.8 | 95 |
| 5,5 | 99.84 | 99.5 | 94.8 |
| 6 | 99.68 | 99.3 | 94.7 |
| 6,5 | 99.26 | 98.9 | 94.2 |
| 7 | 98.91 | 98.9 | 94.1 |
| 7,5 | 98.69 | 98.6 | 93.9 |
| 8 | 98.48 | 98.5 | 93.8 |



Gambar 4.1. Hubungan antara *PDD* radiasi gamma Co-60 dengan fungsi kedalaman untuk SSD 80 cm dan lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm².

4.4 *PDD* untuk Lapangan dengan Filter Cuprum dan Aluminium

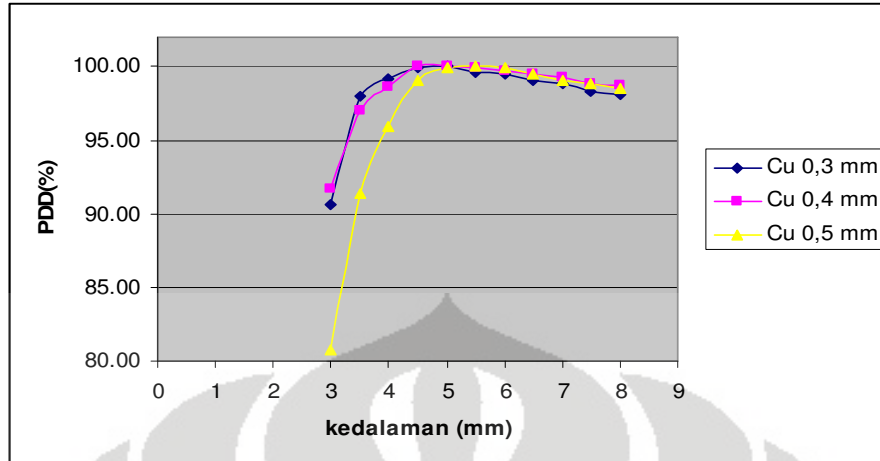
Untuk mengetahui kualitas berkas radiasi, pengukuran dilakukan menggunakan filter tembaga (Cu) dan aluminium (Al) dengan ketebalan bervariasi. Nilai *PDD* untuk lapangan radiasi yang ditutup filter Cu dapat dilihat dalam tabel 4.4 dan dengan grafik dalam gambar 4.2. Sedangkan nilai *PDD* dengan penggunaan filter Al diberikan dalam tabel 4.5 dan dengan grafik dalam gambar 4.3.

Pada pengukuran *PDD* untuk lapangan 10 x10 cm² dengan filter Al 0.8 - 1.2 mm, untuk memperoleh data yang lebih teliti, variasi filter diperbanyak dengan interval ketebalan 0,01 mm. (Tabel 4.6)

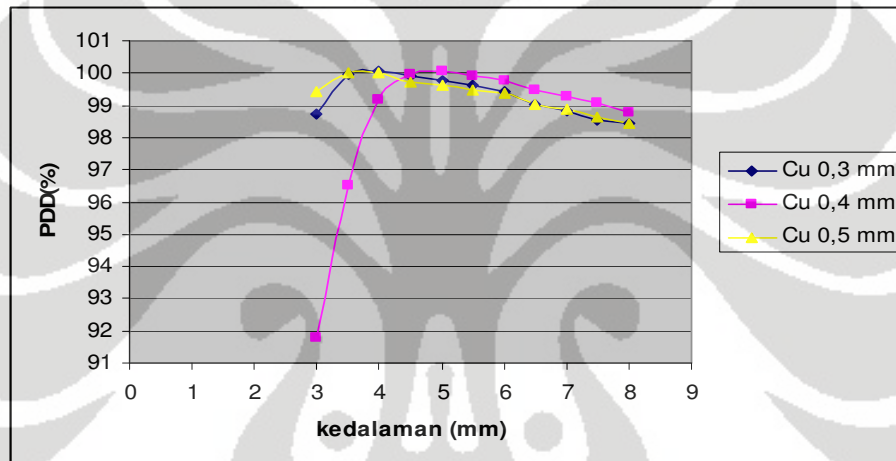
Tabel 4.4. *PDD* pada rentang kedalaman 2-7 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm² dengan filter Cu, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

| <i>d</i> (mm) | <i>PDD</i> (%) | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Cu 0.3 mm | | | Cu 0.4 mm | | | Cu 0.5 mm | | |
| | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² |
| 3 | 90.6 | 76.5 | 99.6 | 91.7 | 91.8 | 93.9 | 80.8 | 99.4 | 99.6 |
| 3.5 | 98.0 | 76.4 | 100 | 97.0 | 96.5 | 97.8 | 91.3 | 100.0 | 100 |
| 4 | 99.2 | 76.4 | 99.9 | 98.6 | 99.2 | 99.2 | 96.0 | 100.0 | 100 |
| 4.5 | 99.9 | 100.0 | 99.8 | 100.0 | 99.9 | 99.9 | 99.2 | 99.7 | 99.82 |
| 5 | 100.0 | 99.9 | 99.7 | 100.0 | 100 | 100.0 | 99.9 | 99.6 | 99.7 |
| 5.5 | 99.7 | 99.6 | 99.4 | 99.9 | 99.9 | 99.7 | 100.1 | 99.5 | 99.5 |
| 6 | 99.5 | 99.3 | 99.3 | 99.8 | 99.8 | 99.5 | 99.9 | 99.4 | 99.2 |
| 6.5 | 99.1 | 99 | 98.9 | 99.5 | 99.5 | 99.1 | 99.5 | 99.0 | 98.9 |
| 6 | 98.9 | 98.9 | 98.7 | 99.3 | 99.3 | 99.0 | 99.1 | 98.9 | 98.8 |
| 7.5 | 98.3 | 98.8 | 98.6 | 98.9 | 99.1 | 98.8 | 98.8 | 98.6 | 98.7 |
| 8 | 98.1 | 98.6 | 98.47 | 98.7 | 98.8 | 98.6 | 98.5 | 98.4 | 98.5 |

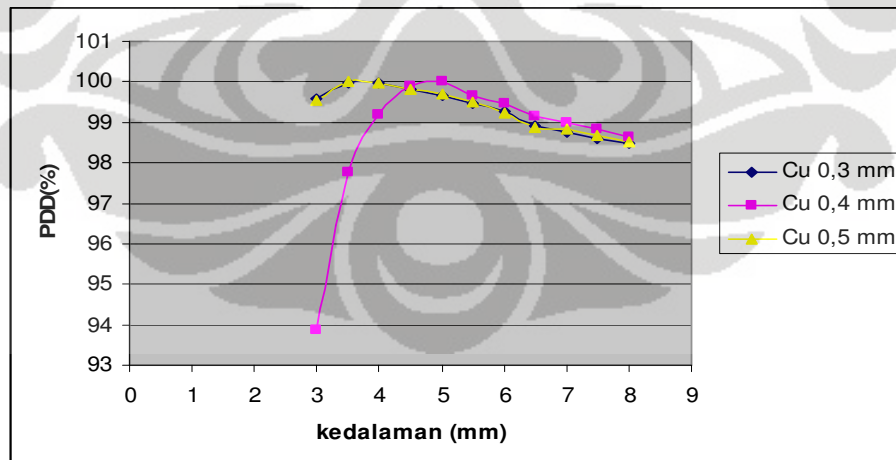
(a)



(b)



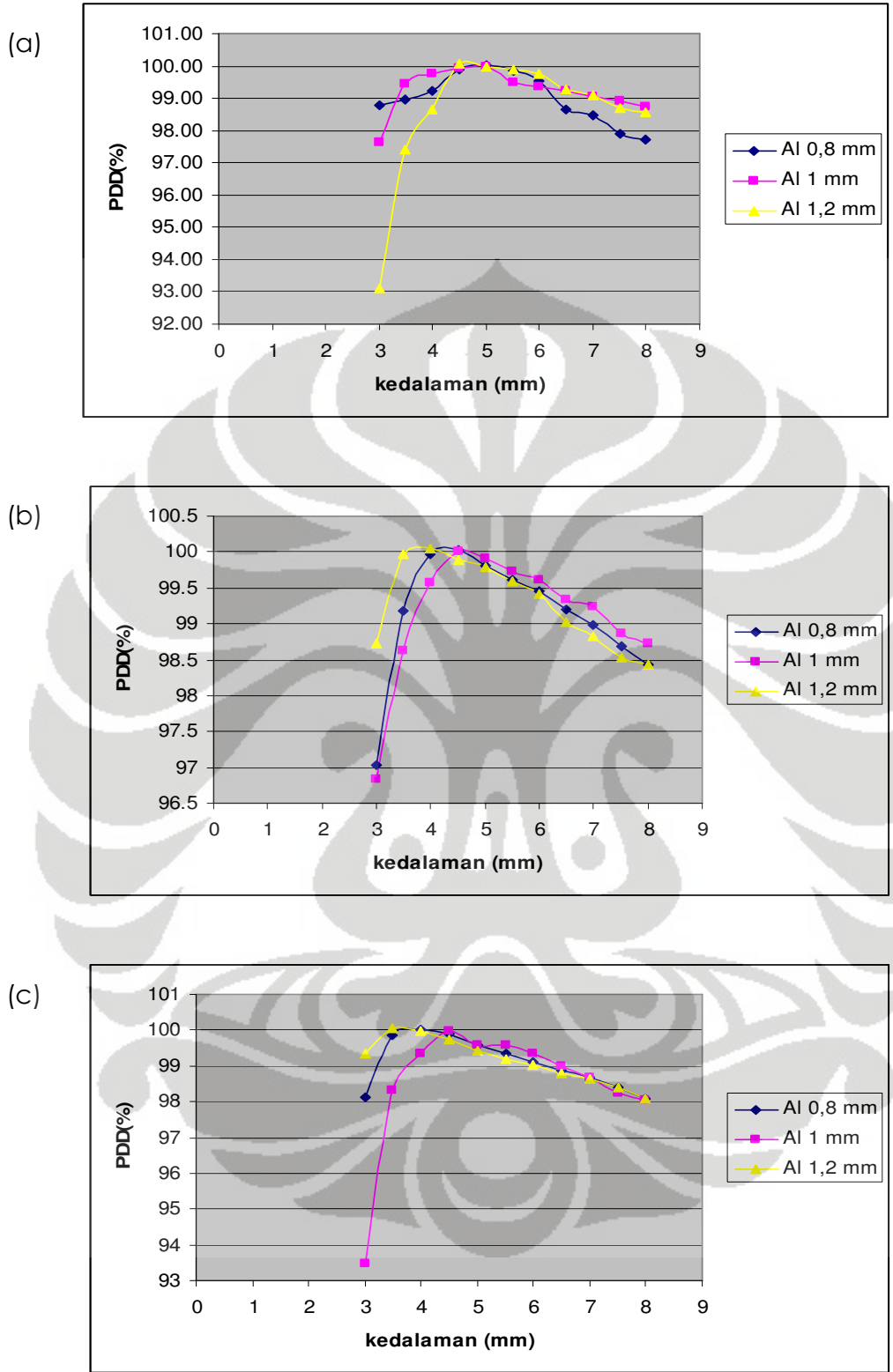
(c)



Gambar 4.2. PDD sebagai fungsi kedalaman dengan berbagai filter Cu untuk lapangan: a. 4x4 cm², b. 10x10 cm², c. 30x30 cm².

Tabel 4.5 *PDD* pada rentang kedalaman 3-8 mm untuk lapangan 4x4, 10x10, dan 30x30 cm² dengan filter Aluminium, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

| <i>d</i> (mm) | <i>PDD</i> | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Al 0.8 mm | | | Al 1 mm | | | Al 1.2 mm | | |
| | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² | 4x4 cm ² | 10x10 cm ² | 30x30 cm ² |
| 3 | 98.8 | 97.0 | 98.1 | 97.6 | 96.8 | 93.5 | 93.1 | 98.7 | 98.1 |
| 3.5 | 99.0 | 99.2 | 99.9 | 99.4 | 98.6 | 98.3 | 97.4 | 99.9 | 9.7 |
| 4 | 99.2 | 99.9 | 100.0 | 99.8 | 99.6 | 99.3 | 98.6 | 100.0 | 100.0 |
| 4.5 | 99.9 | 100.0 | 99.9 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.1 | 99.9 | 99.9 |
| 5 | 100.0 | 99.8 | 99.6 | 100.0 | 99.9 | 99.6 | 100.0 | 99.8 | 99.6 |
| 5.5 | 99.8 | 99.6 | 99.3 | 99.5 | 99.7 | 99.6 | 99.9 | 99.6 | 99.3 |
| 6 | 99.6 | 99.4 | 99.1 | 99.4 | 99.6 | 99.3 | 99.8 | 99.4 | 99.1 |
| 6.5 | 98.6 | 99.2 | 98.9 | 99.2 | 99.3 | 99.0 | 99.3 | 99.0 | 98.9 |
| 7 | 98.4 | 99.0 | 98.7 | 99.0 | 99.2 | 98.7 | 99.1 | 98.8 | 98.7 |
| 7.5 | 97.9 | 98.7 | 98.4 | 98.9 | 98.9 | 98.2 | 98.7 | 98.5 | 98.4 |
| 8 | 97.7 | 98.4 | 98.1 | 98.7 | 98.7 | 98.0 | 98.6 | 98.4 | 98.1 |



Gambar 4.3. *PDD* sebagai fungsi kedalaman dengan berbagai filter Al untuk lapangan: a. $4 \times 4 \text{ cm}^2$, b. $10 \times 10 \text{ cm}^2$, c. $30 \times 30 \text{ cm}^2$.

Tabel 4.6. *PDD* pada rentang kedalaman 3-8 mm untuk lapangan 10x10 cm², *SSD* 80 cm, filter Al dengan interval 0,01 mm, dan waktu penyinaran 1 menit.

| <i>d</i> (mm) | <i>PDD</i> dengan Filter Al 0.8 mm | | | | | <i>PDD</i> dengan Filter Al 1 mm | | |
|------------------|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------------|------------|------------|
| | 0.02 mm | 0.03 mm | 0.04 mm | 0.05 mm | 0.06 mm | 0.02 mm | 0.04 Mm | 0.06 mm |
| 3 | 78.4 | 77.7 | 99.1 | 98.4 | 98.2 | 97.4 | 97.3 | 99.9 |
| 3.5 | 95.0 | 95.7 | 97.6 | 99.7 | 99.8 | 99.5 | 99.6 | 99.9 |
| 4 | 99.0 | 98.7 | 99.7 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 99.9 | 100.0 |
| 4.5 | 99.8 | 99.7 | 100.0 | 99.9 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.8 |
| 5 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 99.7 | 99.7 | 99.9 | 99.8 | 99.8 |
| 5.5 | 99.9 | 99.9 | 99.8 | 99.6 | 99.5 | 99.7 | 99.7 | 99.5 |
| 6 | 99.8 | 99.7 | 99.7 | 99.5 | 99.3 | 99.5 | 98.4 | 99.2 |
| 6.5 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.1 | 98.9 | 99.2 | 98.1 | 99.0 |
| 7 | 99.3 | 99.1 | 99.2 | 98.5 | 98.6 | 98.9 | 97.9 | 98.9 |
| 7.5 | 99.0 | 98.8 | 98.9 | 98.5 | 98.4 | 98.6 | 97.5 | 98.7 |
| 8 | 98.7 | 98.6 | 98.7 | 98.4 | 98.3 | 98.5 | 97.3 | 98.6 |

BAB 5

PEMBAHASAN

Saat ini R.S Persahabatan memiliki pesawat teleterapi cobalt 60 FCC-8000F Shinva, buatan Cina. Menurut informasi pihak rumah sakit, dosis maksimum berkas terjadi pada kedalaman kurang dari 5 mm. Padahal umumnya berkas radiasi Co-60 mempunyai kedalaman maksimum 5 mm^{2,3}. Penurunan dosis kedalaman dimungkinkan oleh berbagai faktor, di antaranya sebagai akibat hamburan yang berasal dari aksesoris-aksesori pada kepala pesawat. Kuantitas interaksi berkas primer dengan aksesoris pada kepala pesawat dipicu kondisi penyusunan sistem yang kurang baik dari produsennya. Elektron kontaminan dan foton energi rendah timbul dari interaksi foton dengan berbagai aksesoris pada kepala pesawat. Kontaminan berkas dapat berupa elektron maupun foton energi rendah. Dalam penelitian telah dilakukan penambahan filter di depan kolimator sebagai usaha untuk mereduksi radiasi hambur yang berasal dari berbagai aksesoris tersebut.

Untuk mengetahui karakter berkas, pertama kali dilakukan pengukuran *PDD* untuk lapangan terbuka. Hasilnya sesuai dengan info pihak rumah sakit, yaitu berkas kedalaman maksimum yang bervariasi, 5 mm untuk lapangan 4x4 cm², 3,5 mm untuk lapangan 10x10 cm², dan 2 mm untuk lapangan 30x30 cm².

Hasil pengukuran di luar daerah *build up* menunjukkan bahwa nilai *PDD* tidak berbeda jauh dari yang ditunjukkan oleh literatur (kesalahan literatur 0,32-0,36%). Selain itu, ditentukan pula nilai $PDD_{(20,10)}$, dan hasilnya diperoleh $\overline{PDD}_{(20,10)}$ 0,459 untuk lapangan 4x4 cm², 0,483 untuk lapangan 10x10 cm², dan 0,549 untuk lapangan 30x30

cm². Nilai ini tidak jauh berbeda dengan yang diberikan literatur, yaitu $PDD_{(20,10)}$ adalah 0,448 untuk lapangan 4x4 cm², 0,489 untuk lapangan 10x10 cm², untuk lapangan 30x30 cm² tidak terdapat data literatur PDD . Pengukuran di luar daerah *build up* ini hanya dilakukan dengan data yang sedikit karena penelitian ini difokuskan pada observasi berkas pada daerah *build up*.

Hasil pengukuran menunjukkan nilai kedalaman maksimum dipengaruhi oleh luas lapangan. Untuk lapangan 4x4 cm² diperoleh kedalaman maksimum 5 mm, sedangkan untuk lapangan 10x10 cm² diperoleh kedalaman maksimum 3,5 mm, selanjutnya untuk lapangan 30x30 cm² diperoleh kedalaman maksimum pada 2 mm. Dari data ini dapat dilihat bahwa kontaminan meningkat dengan kenaikan luas lapangan radiasi. Hal ini disebabkan semakin luas lapangan radiasi, maka akan semakin banyak hamburan. Hamburan berupa elektron dan foton energi rendah inilah yang kemudian mengotori berkas primer.

Elektron dan foton kontaminan dalam kuantitas yang banyak memberikan kontribusi energi rendah yang kemudian mengotori berkas radiasi primer. Sesuai karakteristik radiasi pengion, memberikan dosis kecil di permukaan dan dosis besar di bawah permukaan, adanya pengotor berenergi rendah kemudian menggeser distribusi dosis pada daerah *build up* hingga dosis maksimum telah diperoleh pada kedalaman 5 mm untuk lapangan 4x4 cm²; 3,5 mm untuk lapangan 10x10 cm²; 2 mm untuk lapangan 30x30 cm². Hasil ini memberikan gambaran bahwa kedalaman maksimum keluaran radiasi gamma pesawat teleterapi Cobalt 60 FCC-8000F Shinva bergeser dari normalnya.

Dengan pergeseran kedalaman maksimum yang berarti pengurangan daerah build up, mempunyai konsekuensi meningginya dosis di daerah kulit. Dengan sendirinya akan berakibat *efek skin sparing* menurun. Dalam praktiknya, kerusakan kulit yang diderita pasien akan lebih parah.

Selanjutnya usaha peningkatan kedalaman maksimum pada daerah build up dilakukan dengan memberikan filter di depan kolimator. Pemasangan filter dibuat menempel serapat mungkin dengan bukaan kolimator agar seluruh berkas melewati filter.

Filter Cu yang digunakan memiliki ketebalan antara 0,3-0,5 mm. Filter Cu dengan tebal kurang dari 0,3 mm tidak menggeser daerah build up secara signifikan, namun tebal lebih dari 0,5 mm justru mengurangi dosis output secara keseluruhan.

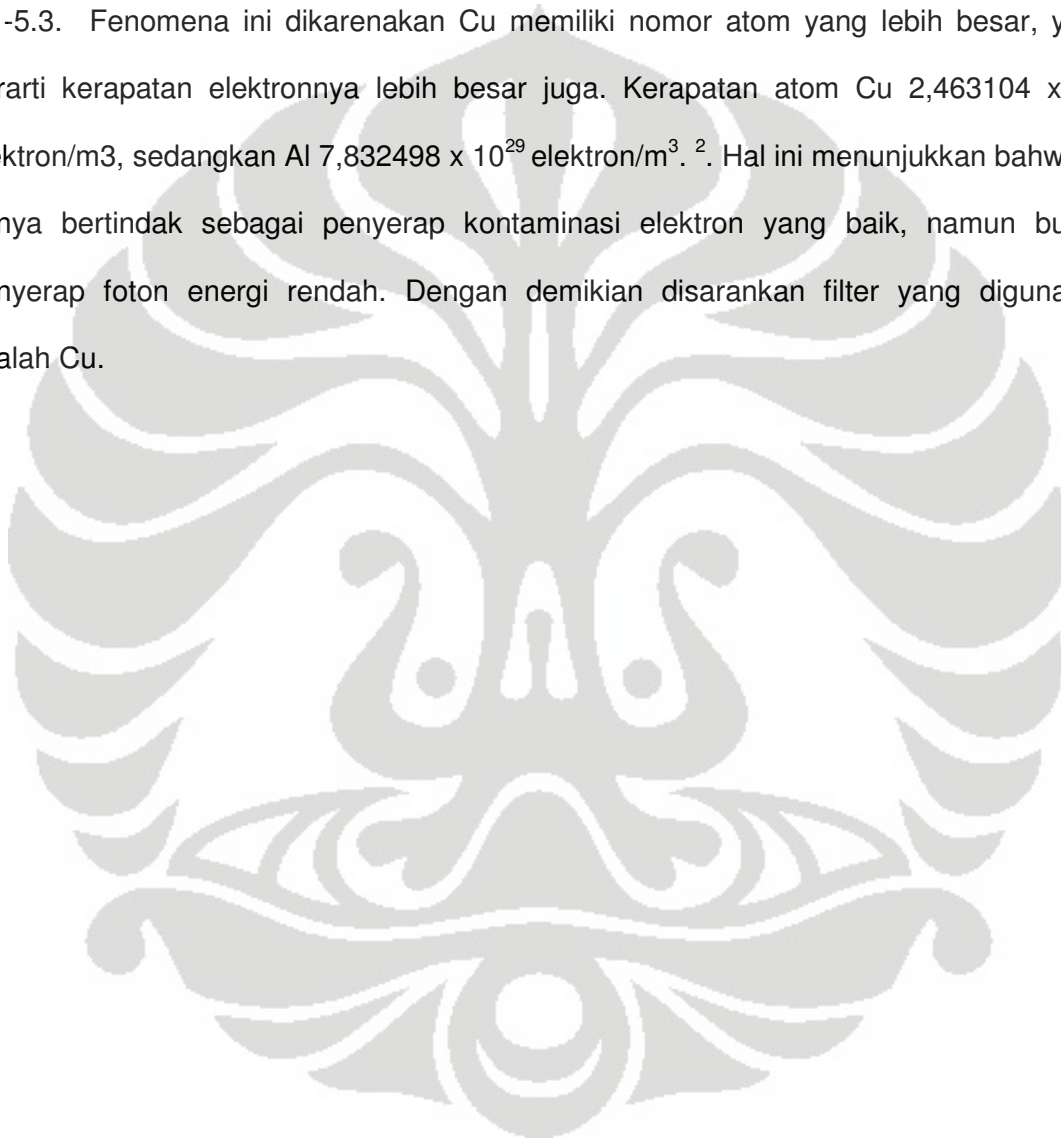
Mengingat kontaminasi berkas dipengaruhi oleh luas lapangan, maka filter Cu yang paling efektif digunakan untuk memperoleh kedalaman maksimum mendekati normal adalah 0,4 mm untuk lapangan radiasi 10x10 cm² dan 30x30 cm², sedangkan lapangan radiasi 4x4 cm² tidak mengalami penurunan build up walau tanpa filter. Dengan filter efektif diperoleh kedalaman maksimum 5 mm untuk lapangan radiasi 4x4, 10x10, dan 30x30 cm².

Selain menggunakan filter Cu, dalam penelitian ini juga digunakan filter Al. Hasil pengukuran *PDD* dengan filter Al ketebalan 1 mm paling efektif untuk mengurangi kontaminan, namun dengan hasil yang relatif lebih rendah dibanding filter Cu.

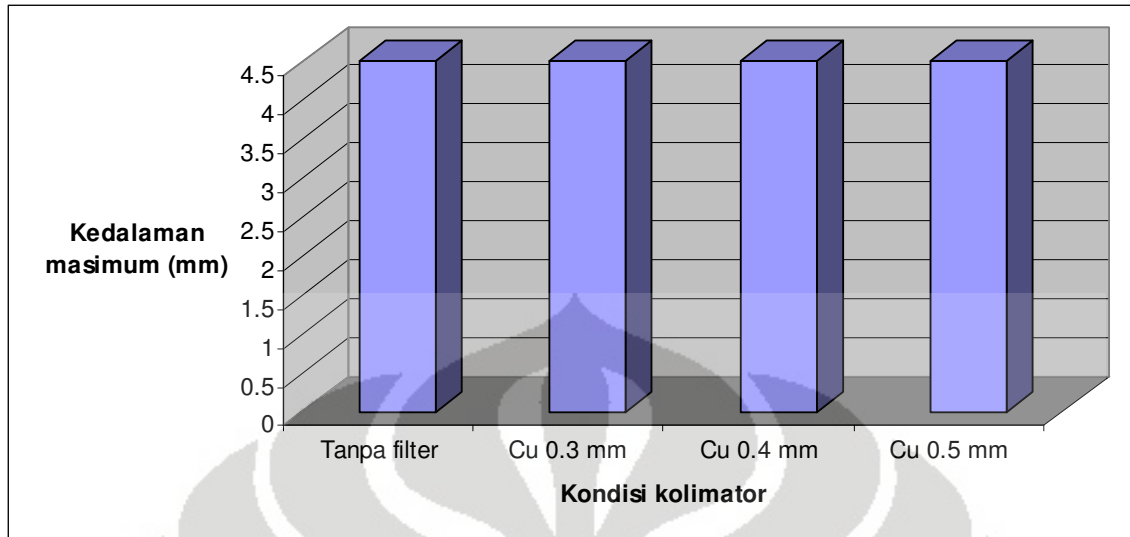
Pada mulanya penggunaan filter Al menghasilkan kedalaman maksimum pada 4,5 mm. Untuk memperoleh ketelitian yang lebih tinggi dalam menentukan kedalaman maksimum, interval ketebalan filter dipersempit menjadi 0,01 mm. Hasilnya diperoleh

kedalaman maksimum pada 5 mm untuk lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dengan filter Al berketebalan 0,83 mm.

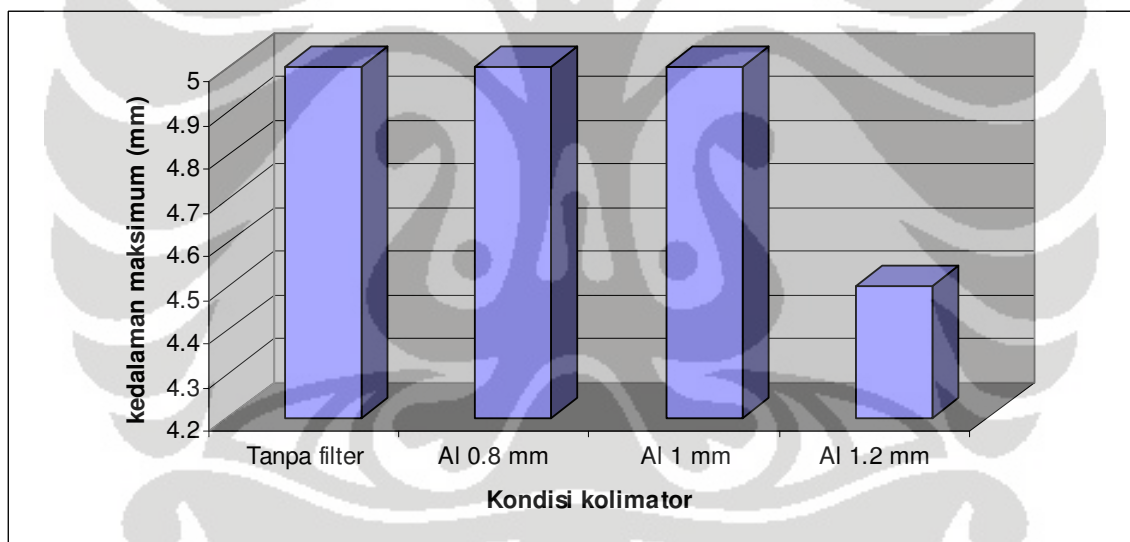
Dari kedua jenis filter, ternyata filter Cu lebih unggul dibanding Al dalam meningkatkan kedalaman maksimum. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 5.1-5.3. Fenomena ini dikarenakan Cu memiliki nomor atom yang lebih besar, yang berarti kerapatan elektronnya lebih besar juga. Kerapatan atom Cu $2,463104 \times 10^{30}$ elektron/m³, sedangkan Al $7,832498 \times 10^{29}$ elektron/m³.². Hal ini menunjukkan bahwa Al hanya bertindak sebagai penyerap kontaminasi elektron yang baik, namun bukan penyerap foton energi rendah. Dengan demikian disarankan filter yang digunakan adalah Cu.



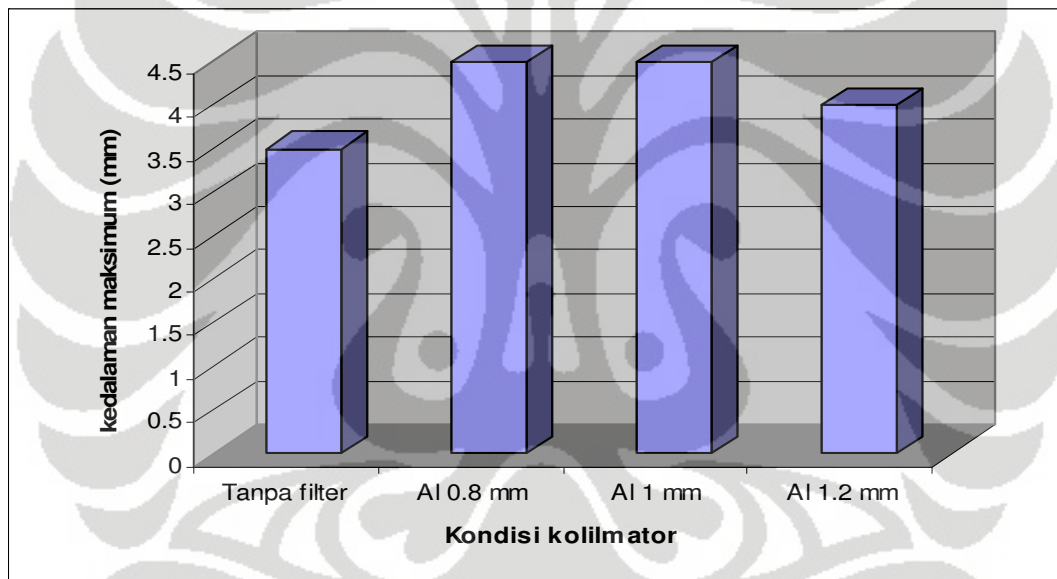
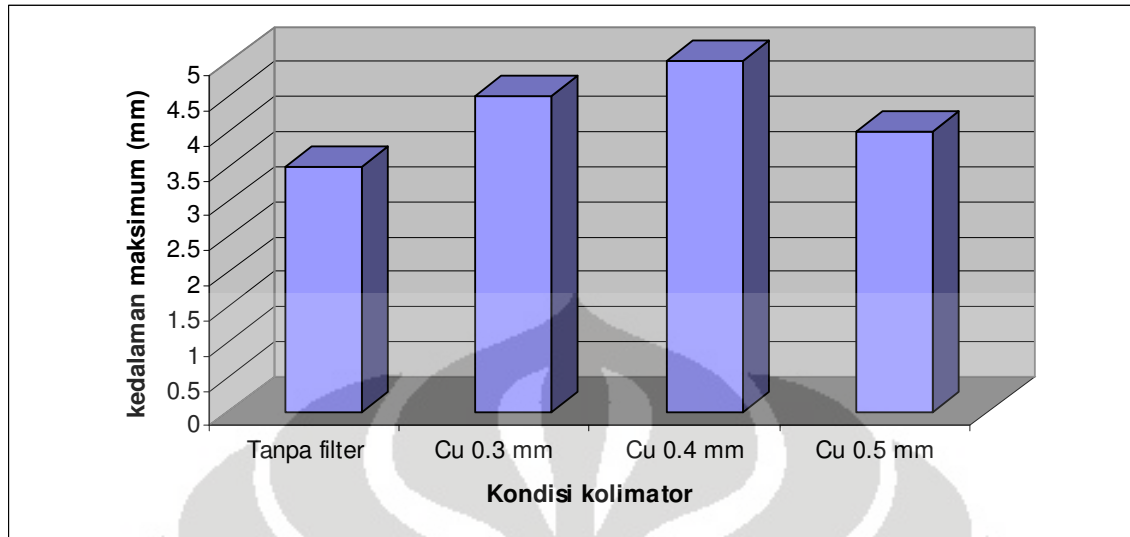
(a)



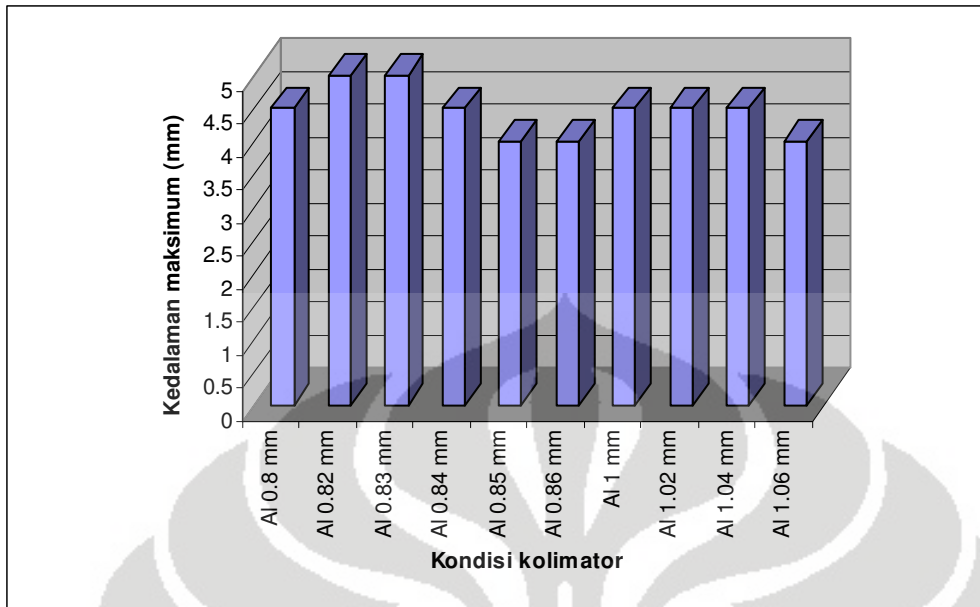
(b)



Gambar 5.1. Perbandingan kualitas antara filter Cu (a) dan filter Al (b) dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $4 \times 4 \text{ cm}^2$, SSD 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.

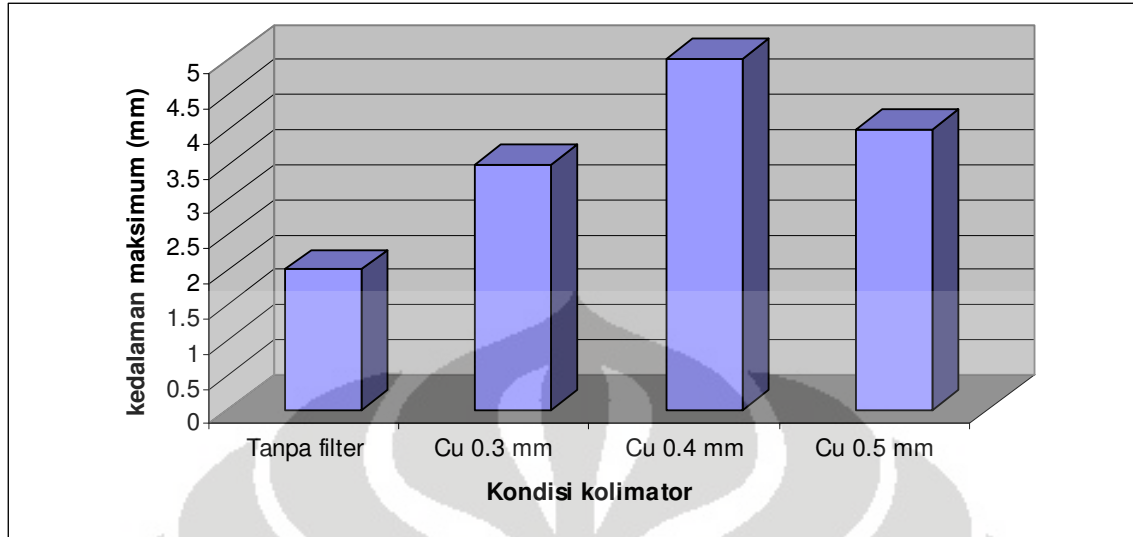


Gambar 5.2. Perbandingan kualitas antara filter Cu (a) dan filter Al (b) dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, SSD 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.

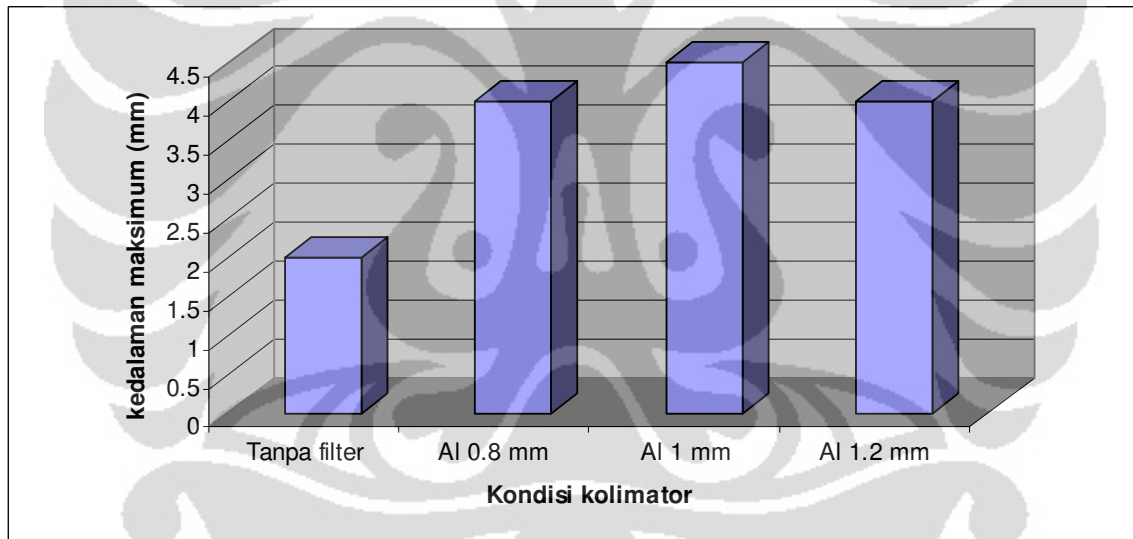


Gambar 5.3. Perbandingan kualitas filter Al dengan interval ketebalan 0,01 mm dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi 10x10 cm², SSD 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.

(a)



(b)



Gambar 5.4. Perbandingan kualitas filter efektif antara filter Cu (a) dan filter Al (b) dalam meningkatkan kedalaman maksimum untuk lapangan radiasi $30 \times 30 \text{ cm}^2$, SSD 80 cm, dengan waktu penyinaran 1 menit.

Pada umumnya pemberian filter akan meningkatkan kedalaman maksimum, dan peningkatannya akan sangat signifikan pada luas lapangan tinggi. Fenomena ini dapat dimengerti karena penyebab kontaminasi meningkat dengan kenaikan luas lapangan. Dalam praktik pemberian filter yang bervariasi terhadap luas lapangan tidak praktis karena ukuran lapangan sangat tergantung pada ukuran tumor, oleh sebab itu disarankan penggunaan Cu dengan ketebalan 0,4 mm untuk semua lapangan.



Bab 6

Kesimpulan dan Saran

6.1. Kesimpulan

Dari penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontaminasi elektron dan foton hambur dari sistem kepala pesawat teleterapi cobalt 60 FCC-8000F Shinva memperpendek daerah *build up*, tetapi tidak berpengaruh pada *PDD* setelah daerah *build up*. Hasil penelitian memperoleh nilai $PDD_{(20,10)}$ 0,459 untuk lapangan radiasi $4 \times 4 \text{ cm}^2$, 0,483 untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, dan 0,549 untuk lapangan radiasi $30 \times 30 \text{ cm}^2$, yang tidak jauh berbeda dengan $PDD_{(20,10)}$ literatur (kesalahan literatur = 1,2 - 2,4%).
2. Filter Cu dengan ketebalan 0,4 mm telah meningkatkan kedalaman maksimum dari 3,5 mm ($\delta = 0,2\%$) menjadi 5 mm untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 2 mm menjadi 5 mm untuk lapangan radiasi $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ($\delta = 0,8-1,1\%$), sedangkan untuk lapangan $4 \times 4 \text{ cm}^2$ tidak mengalami perubahan kedalaman maksimum karena tanpa pemakaian filter pun kedalaman maksimum diperoleh pada 5 mm ($\delta = 27,7\%$).
3. Filter Al paling efektif yang dapat meningkatkan kedalaman maksimum menjadi 5 mm adalah 0,83 mm untuk lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ($\delta = 3,2\%$).

4. Filter Cu lebih baik dibanding Al karena Cu tidak hanya menyerap kontaminan elektron, namun juga efektif untuk menyerap foton hambur dengan energi rendah.
5. Tingkat kontaminasi dipengaruhi oleh luas lapangan radiasi, yaitu meningkatnya kontaminasi berbanding lurus dengan bertambahnya luas lapangan radiasi.

6.2. Saran

Mengingat dalam praktik luas lapangan disesuaikan dengan ukuran tumor, maka disarankan penggunaan filter Cu 0,4 mm untuk semua lapangan.



DAFTAR ACUAN

1. **S. Shahabi**, "*Blackburn's Introduction to Clinical Radiation Therapy Physics*", Medical Physics Publishing Cooperation, Madison, Wisconsin.
2. **H. E. Johns and J. R. Cunningham**, "*The Physics of Radiology*", Charles C. Thomas, Illinois, 1983.
3. **P. M. K. Leung**, "*The Physical Basic of Radiotherapy*", Canada, 1990.
4. **E. B. Podgorsak**, "*Radiation Oncology Physics: A Handbook of Teachers and Students*", IAEA, Vienna, Austria, 2005.
5. **Rosenow**, "*Medical Electrical Equipment Dosimeters with Ionization Chamber as Used in Radiotherapy*", Gottingen University, Germany, IEC 60751.
6. **M. Roos, K. Derikum, A. Krauss**, "*Physikalisch Technische Bundesanstalt*", Braunschweig, Germany, 2004.
7. **P.R. Almond, P. Andreo, O. Mattsson, A.E. Nahum and M. Roos**, "*The use of plane-parallel ionization chamber in high-energy electron and photon beams. An international Code of practice for dosimetry IAEA Technical Report Series no 381*", Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
8. **F. M. Khan**, "*The Physics of Radiation Therapy*", William & Wilkins, Baltimore, USA, 1984.
9. **Technical Reports Series No. 277**, "*Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams*" (IAEA, Vienna, Austria, 1987).

LAMPIRAN 1

Data baca cacahan elektrometer dengan detektor Farmer untuk pengukuran output pesawat teleterapi cobalt 60 FCC-8000F Shinva, dengan fantom air pada kedalaman 2, 5, 10 cm, SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 10 menit.

$d = 2 \text{ cm}$

| | M_1 | M_2 | M_3 |
|-----|-------|-------|-------|
| V- | 45,2 | 45,2 | 45,2 |
| V+ | 45,35 | 45,35 | 45,35 |
| V/4 | 44,95 | 44,95 | 44,95 |

$d = 5 \text{ cm}$

| | M_1 | M_2 | M_3 |
|-----|-------|-------|-------|
| V- | 37,9 | 37,9 | 37,9 |
| V+ | 37,95 | 37,95 | 37,95 |
| V/4 | 37,65 | 37,65 | 37,65 |

$d = 10 \text{ cm}$

| | M_1 | M_2 | M_3 |
|-----|-------|-------|-------|
| V- | 26,95 | 26,95 | 26,95 |
| V+ | 27,05 | 27,05 | 27,05 |
| V/4 | 2,85 | 26,85 | 26,85 |

LAMPIRAN 2

Data baca cacahan elektrometer PTW Unidos, dengan detektor Markus tipe TM untuk pengukuran output pesawat Co-60 FCC-8000F Shinva, dengan fantom air pada rentang kedalaman *build up*, 10, dan 20 cm, lapangan radiasi 4x4 cm², SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

Tanpa filter

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 2.571 | 3.447 | 3.527 | 3.545 | 3.547 | 3.541 | 3.535 | 3.521 | 3.508 | 3.5 | 3.493 | 1.744 | 0.772 |
| 2 | 2.572 | 3.447 | 3.528 | 3.546 | 3.546 | 3.541 | 3.535 | 3.52 | 3.508 | 3.5 | 3.493 | 1.743 | 0.772 |
| 3 | 2.572 | 3.446 | 3.527 | 3.546 | 3.547 | 3.541 | 3.535 | 3.52 | 3.507 | 3.5 | 3.492 | 1.744 | 0.772 |

Filter Cu 0,3 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.178 | 3.439 | 3.479 | 3.508 | 3.51 | 3.496 | 3.49 | 3.477 | 3.469 | 3.449 | 3.443 | 1.716 | 0.761 |
| 2 | 3.178 | 3.44 | 3.479 | 3.508 | 3.509 | 3.496 | 3.491 | 3.478 | 3.469 | 3.449 | 3.442 | 1.717 | 0.762 |
| 3 | 3.178 | 3.439 | 3.479 | 3.508 | 3.51 | 3.497 | 3.491 | 3.478 | 3.47 | 3.45 | 3.443 | 1.717 | 0.762 |

Filter Cu 0,4 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.203 | 3.387 | 3.444 | 3.492 | 3.493 | 3.49 | 3.484 | 3.474 | 3.469 | 3.454 | 3.449 | 1.723 | 0.765 |
| 2 | 3.202 | 3.387 | 3.445 | 3.492 | 3.493 | 3.49 | 3.485 | 3.474 | 3.47 | 3.454 | 3.449 | 1.723 | 0.765 |
| 3 | 3.202 | 3.386 | 3.444 | 3.493 | 3.493 | 3.49 | 3.485 | 3.474 | 3.469 | 3.455 | 3.449 | 1.723 | 0.765 |

Filter Cu 0,5 mm

| | <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 2.813 | 3.182 | 3.344 | 3.451 | 3.481 | 3.486 | 3.48 | 3.464 | 3.451 | 3.442 | 3.431 | 1.718 | 0.763 |
| 2 | 2.814 | 3.181 | 3.343 | 3.451 | 3.481 | 3.486 | 3.481 | 3.465 | 3.451 | 3.443 | 3.432 | 1.718 | 0.763 |
| 3 | 2.814 | 3.183 | 3.343 | 3.451 | 3.481 | 3.486 | 3.48 | 3.465 | 3.452 | 3.443 | 3.432 | 1.718 | 0.762 |

Filter Al 0,8 mm

| | <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.49 | 3.498 | 3.508 | 3.53 | 3.534 | 3.529 | 3.518 | 3.486 | 3.48 | 3.461 | 3.453 | 1.722 | 0.764 |
| 2 | 3.491 | 3.498 | 3.507 | 3.53 | 3.535 | 3.528 | 3.518 | 3.486 | 3.479 | 3.46 | 3.454 | 1.722 | 0.764 |
| 3 | 3.491 | 3.498 | 3.507 | 3.53 | 3.534 | 3.528 | 3.519 | 3.486 | 3.479 | 3.46 | 3.454 | 1.722 | 0.764 |

Filter Al 1 mm

| | <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.837 | 3.906 | 3.92 | 3.925 | 3.929 | 3.909 | 3.904 | 3.898 | 3.891 | 3.886 | 3.879 | 2.419 | 1.326 |
| 2 | 3.835 | 3.907 | 3.92 | 3.927 | 3.928 | 3.91 | 3.904 | 3.898 | 3.892 | 3.887 | 3.879 | 2.419 | 1.327 |
| 3 | 3.837 | 3.907 | 3.92 | 3.925 | 3.929 | 3.909 | 3.904 | 3.898 | 3.892 | 3.886 | 3.88 | 2.419 | 1.327 |

Filter Al 1,02 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 100 | 200 |
| 1 | 3.602 | 3.679 | 3.7 | 3.7 | 3.694 | 3.688 | 3.68 | 3.668 | 3.659 | 3.648 | 3.643 | 2.054 | 0.994 |
| 2 | 3.602 | 3.679 | 3.7 | 3.7 | 3.695 | 3.688 | 3.68 | 3.669 | 3.659 | 3.648 | 3.643 | 2.054 | 0.994 |
| 3 | 3.602 | 3.679 | 3.7 | 3.7 | 3.695 | 3.688 | 3.681 | 3.669 | 3.66 | 3.649 | 3.643 | 2.054 | 0.994 |

Filter Al 1,04 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 100 | 200 |
| 1 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.658 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.99 |
| 2 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.659 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.991 |
| 3 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.659 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.991 |

Filter Al 1,06 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 100 | 200 |
| 1 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.658 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.99 |
| 2 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.659 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.991 |
| 3 | 3.674 | 3.675 | 3.7 | 3.669 | 3.667 | 3.659 | 3.648 | 3.639 | 3.635 | 3.628 | 3.624 | 2.047 | 0.991 |

Filter 1,2 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.253 | 3.404 | 3.447 | 3.497 | 3.494 | 3.49 | 3.486 | 3.469 | 3.463 | 3.449 | 3.444 | 1.722 | 0.763 |
| 2 | 3.254 | 3.403 | 3.447 | 3.496 | 3.493 | 3.49 | 3.486 | 3.47 | 3.464 | 3.449 | 3.444 | 1.721 | 0.763 |
| 3 | 3.254 | 3.403 | 3.447 | 3.496 | 3.493 | 3.49 | 3.486 | 3.47 | 3.463 | 3.449 | 3.445 | 1.721 | 0.763 |

LAMPIRAN 3

Data baca cacahan elektrometer PTW Unidos, dengan detektor Markus tipe TM untuk pengukuran output pesawat Co-60 FCC-8000F Shinva, dengan fantom air pada rentang kedalaman *build up*, 100, dan 200 mm, lapangan radiasi 10x10 cm², SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

Tanpa filter

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.704 | 3.738 | 3.739 | 3.732 | 3.729 | 3.717 | 3.712 | 3.698 | 3.695 | 3.687 | 3.681 | 2.076 | 1.003 |
| 2 | 3.706 | 3.738 | 3.739 | 3.733 | 3.729 | 3.717 | 3.713 | 3.698 | 3.695 | 3.687 | 3.681 | 2.076 | 1.003 |
| 3 | 3.706 | 3.737 | 3.738 | 3.733 | 3.729 | 3.717 | 3.713 | 3.698 | 3.696 | 3.688 | 3.681 | 2.076 | 1.003 |

Filter Cu 0,3 mm

| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 2.884 | 2.882 | 2.881 | 3.771 | 3.766 | 3.755 | 3.743 | 3.735 | 3.73 | 3.725 | 3.718 | 2.752 | 1.321 |
| 2 | 2.885 | 2.882 | 2.881 | 3.771 | 3.766 | 3.755 | 3.744 | 3.735 | 3.731 | 3.725 | 3.718 | 2.752 | 1.321 |
| 3 | 2.885 | 2.882 | 2.881 | 3.771 | 3.767 | 3.754 | 3.742 | 3.735 | 3.731 | 3.726 | 3.719 | 2.752 | 1.321 |

Filter Cu 0,4 mm

| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.444 | 3.622 | 3.721 | 3.751 | 3.754 | 3.749 | 3.743 | 3.733 | 3.725 | 3.717 | 3.707 | 2.745 | 1.318 |
| 2 | 3.444 | 3.622 | 3.722 | 3.751 | 3.754 | 3.749 | 3.744 | 3.733 | 3.725 | 3.717 | 3.707 | 2.746 | 1.318 |
| 3 | 3.445 | 3.624 | 3.722 | 3.751 | 3.754 | 3.75 | 3.744 | 3.734 | 3.725 | 3.718 | 3.707 | 2.746 | 1.317 |

Filter Cu 0,5 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| No. | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.741 | 3.763 | 3.762 | 3.753 | 3.749 | 3.743 | 3.739 | 3.727 | 3.72 | 3.711 | 3.704 | 2.728 | 1.316 |
| 2 | 3.741 | 3.763 | 3.763 | 3.753 | 3.749 | 3.744 | 3.74 | 3.727 | 3.72 | 3.711 | 3.704 | 2.728 | 1.316 |
| 3 | 3.741 | 3.764 | 3.763 | 3.753 | 3.75 | 3.744 | 3.74 | 3.727 | 3.72 | 3.712 | 3.703 | 2.726 | 1.316 |

Filter Al 0,8 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.593 | 3.672 | 3.702 | 3.704 | 3.696 | 3.688 | 3.683 | 3.673 | 3.666 | 3.654 | 3.645 | 2.059 | 0.995 |
| 2 | 3.593 | 3.672 | 3.702 | 3.704 | 3.696 | 3.688 | 3.683 | 3.674 | 3.666 | 3.654 | 3.645 | 2.059 | 0.996 |
| 3 | 3.593 | 3.673 | 3.702 | 3.704 | 3.697 | 3.689 | 3.683 | 3.674 | 3.665 | 3.655 | 3.645 | 2.059 | 0.996 |

Filter Al 0,82 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 2.896 | 3.51 | 3.658 | 3.688 | 3.695 | 3.694 | 3.687 | 3.674 | 3.668 | 3.659 | 3.648 | 2.065 | 1.001 |
| 2 | 2.896 | 3.51 | 3.658 | 3.688 | 3.696 | 3.694 | 3.687 | 3.674 | 3.668 | 3.659 | 3.648 | 2.065 | 1.001 |
| 3 | 2.897 | 3.51 | 3.658 | 3.688 | 3.696 | 3.694 | 3.687 | 3.674 | 3.668 | 3.659 | 3.648 | 2.065 | 1.001 |

Filter Al 0,83 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 2.873 | 3.535 | 3.647 | 3.694 | 3.695 | 3.692 | 3.684 | 3.672 | 3.663 | 3.652 | 3.642 | 2.057 | 0.997 |
| 2 | 2.872 | 3.535 | 3.647 | 3.694 | 3.695 | 3.693 | 3.684 | 3.672 | 3.663 | 3.652 | 3.642 | 2.057 | 0.998 |
| 3 | 2.872 | 3.536 | 3.646 | 3.694 | 3.697 | 3.693 | 3.685 | 3.673 | 3.662 | 3.652 | 3.641 | 2.056 | 0.998 |

Filter Al 0,84 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-----|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.546 | 3.604 | 3.68 | 3.693 | 3.691 | 3.685 | 3.68 | 3.671 | 3.663 | 3.65 | 3.645 | 2.066 | 1 |
| 2 | 3.546 | 3.604 | 3.68 | 3.693 | 3.691 | 3.685 | 3.681 | 3.672 | 3.664 | 3.65 | 3.645 | 2.066 | 1 |
| 3 | 3.546 | 3.604 | 3.68 | 3.693 | 3.691 | 3.685 | 3.681 | 3.672 | 3.664 | 3.65 | 3.645 | 2.066 | 1 |

Filter Al 0,85 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.649 | 3.696 | 3.707 | 3.703 | 3.697 | 3.691 | 3.687 | 3.675 | 3.662 | 3.65 | 3.647 | 2.059 | 0.997 |
| 2 | 3.649 | 3.695 | 3.707 | 3.702 | 3.697 | 3.691 | 3.688 | 3.674 | 3.633 | 3.651 | 3.646 | 2.059 | 0.997 |
| 3 | 3.648 | 3.695 | 3.707 | 3.703 | 3.697 | 3.691 | 3.687 | 3.675 | 3.663 | 3.65 | 3.646 | 2.059 | 0.997 |

Filter Al 0,86 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.628 | 3.684 | 3.693 | 3.689 | 3.682 | 3.674 | 3.668 | 3.651 | 3.641 | 3.635 | 3.63 | 2.046 | 0.993 |
| 2 | 3.628 | 3.684 | 3.693 | 3.689 | 3.682 | 3.674 | 3.668 | 3.651 | 3.642 | 3.635 | 3.63 | 2.046 | 0.993 |
| 3 | 3.628 | 3.684 | 3.693 | 3.689 | 3.682 | 3.674 | 3.668 | 3.651 | 3.642 | 3.635 | 3.63 | 2.047 | 0.993 |

Filter Al 1mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.583 | 3.649 | 3.685 | 3.7 | 3.696 | 3.69 | 3.685 | 3.675 | 3.671 | 3.658 | 3.652 | 2.065 | 0.999 |
| 2 | 3.583 | 3.65 | 3.684 | 3.701 | 3.696 | 3.69 | 3.686 | 3.675 | 3.672 | 3.658 | 3.653 | 2.066 | 0.999 |
| 3 | 3.582 | 3.649 | 3.684 | 3.7 | 3.697 | 3.69 | 3.686 | 3.676 | 3.673 | 3.658 | 3.653 | 2.066 | 1 |

Filter Al 1,2 mm

| <i>Kedalaman (mm)</i> | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.651 | 3.697 | 3.7 | 3.695 | 3.69 | 3.684 | 3.677 | 3.663 | 3.655 | 3.644 | 3.641 | 2.053 | 0.993 |
| 2 | 3.652 | 3.697 | 3.7 | 3.695 | 3.691 | 3.684 | 3.677 | 3.663 | 3.655 | 3.644 | 3.64 | 2.053 | 0.993 |
| 3 | 3.651 | 3.697 | 3.7 | 3.694 | 3.691 | 3.683 | 3.677 | 3.662 | 3.655 | 3.644 | 3.64 | 2.053 | 0.993 |

LAMPIRAN 4

Data baca cacahan elektrometer PTW Unidos, dengan detektor Markus tipe TM untuk pengukuran output pesawat Co-60 FCC-8000F Shinva, dengan fantom air pada rentang kedalaman *build up*, 100, dan 200 mm, lapangan radiasi 30x30 cm², SSD 80 cm dengan waktu penyinaran 1 menit.

Tanpa filter

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 |
| 1 | 4.142 | 4.142 | 4.202 | 4.176 | 4.127 | 4.067 | 4.037 | 4.002 | 3.993 | 3.981 | 3.976 | 3.958 |
| 2 | 4.143 | 4.142 | 4.201 | 4.174 | 4.125 | 4.065 | 4.036 | 4.003 | 3.991 | 3.982 | 3.977 | 3.958 |
| 3 | 4.143 | 4.142 | 4.201 | 4.176 | 4.127 | 4.067 | 4.037 | 4.002 | 3.993 | 3.982 | 3.976 | 3.958 |

| Kedalaman (mm) | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 3.952 | 3.944 | 3.94 | 2.454 | 1.347 |
| 3.952 | 3.943 | 3.939 | 2.455 | 1.347 |
| 3.953 | 3.943 | 3.94 | 2.454 | 1.348 |

Filter Cu 0,3 mm

| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.884 | 3.900 | 3.898 | 3.893 | 3.888 | 3.879 | 3.872 | 3.856 | 3.851 | 3.845 | 3.841 | 2.389 | 1.308 |
| 2 | 3.883 | 3.898 | 3.898 | 3.893 | 3.886 | 3.878 | 3.871 | 3.858 | 3.851 | 3.846 | 3.841 | 2.389 | 1.308 |
| 3 | 3.884 | 3.9 | 3.899 | 3.892 | 3.888 | 3.878 | 3.871 | 3.858 | 3.851 | 3.845 | 3.839 | 2.389 | 1.308 |

Filter Cu 0,4 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.642 | 3.793 | 3.849 | 3.876 | 3.881 | 3.868 | 3.86 | 3.846 | 3.839 | 3.834 | 3.828 | 2.38 | 1.304 |
| 2 | 3.643 | 3.793 | 3.848 | 3.875 | 3.88 | 3.867 | 3.859 | 3.846 | 3.841 | 3.835 | 3.826 | 2.381 | 1.304 |
| 3 | 3.642 | 3.793 | 3.849 | 3.876 | 3.882 | 3.867 | 3.859 | 3.848 | 3.841 | 3.835 | 3.828 | 2.381 | 1.304 |

Filter Cu 0,5 mm

| No | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.873 | 3.892 | 3.89 | 3.883 | 3.878 | 3.87 | 3.86 | 3.846 | 3.844 | 3.839 | 3.832 | 2.386 | 1.308 |
| 2 | 3.872 | 3.891 | 3.889 | 3.883 | 3.877 | 3.871 | 3.86 | 3.847 | 3.844 | 3.838 | 3.832 | 2.386 | 1.309 |
| 3 | 3.872 | 3.891 | 3.89 | 3.883 | 3.878 | 3.871 | 3.859 | 3.847 | 3.844 | 3.839 | 3.834 | 2.386 | 1.309 |

Filter Al 0,8 mm

| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.856 | 3.925 | 3.930 | 3.927 | 3.914 | 3.903 | 3.895 | 3.885 | 3.879 | 3.865 | 3.856 | 2.399 | 1.319 |
| 2 | 3.856 | 3.924 | 3.931 | 3.927 | 3.914 | 3.904 | 3.895 | 3.886 | 3.878 | 3.868 | 3.856 | 2.399 | 1.319 |
| 3 | 3.856 | 3.925 | 3.931 | 3.926 | 3.914 | 3.904 | 3.895 | 3.886 | 3.879 | 3.868 | 3.854 | 2.4 | 1.319 |

Filter Al 1 mm

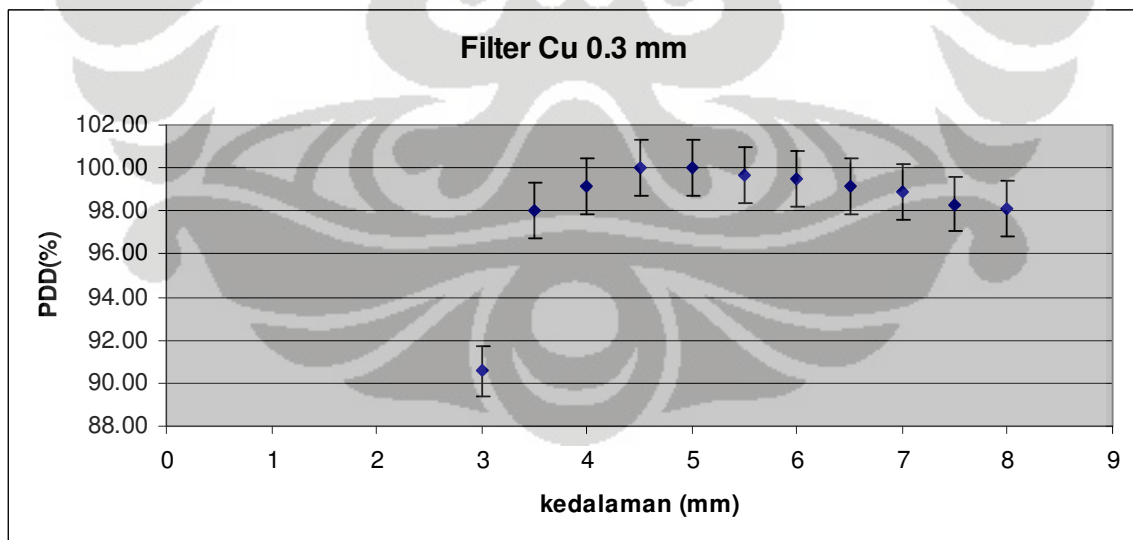
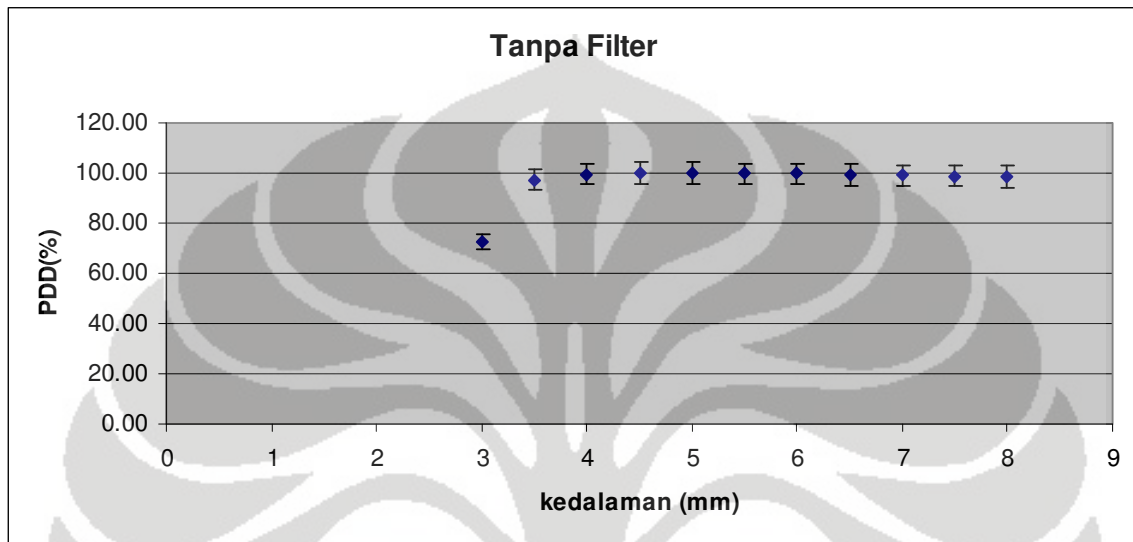
| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.287 | 3.457 | 3.492 | 3.516 | 3.502 | 3.502 | 3.492 | 3.48 | 3.47 | 3.454 | 3.446 | 1.717 | 0.762 |
| 2 | 3.286 | 3.457 | 3.492 | 3.515 | 3.501 | 3.501 | 3.492 | 3.48 | 3.47 | 3.454 | 3.447 | 1.717 | 0.763 |
| 3 | 3.286 | 3.456 | 3.493 | 3.516 | 3.502 | 3.502 | 3.493 | 3.481 | 3.47 | 3.454 | 3.447 | 1.717 | 0.763 |

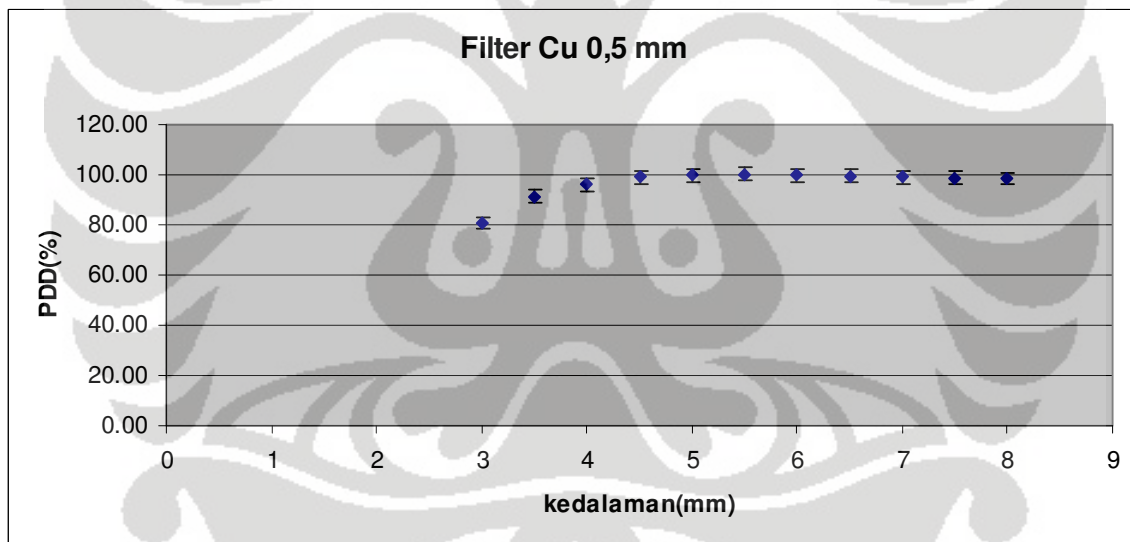
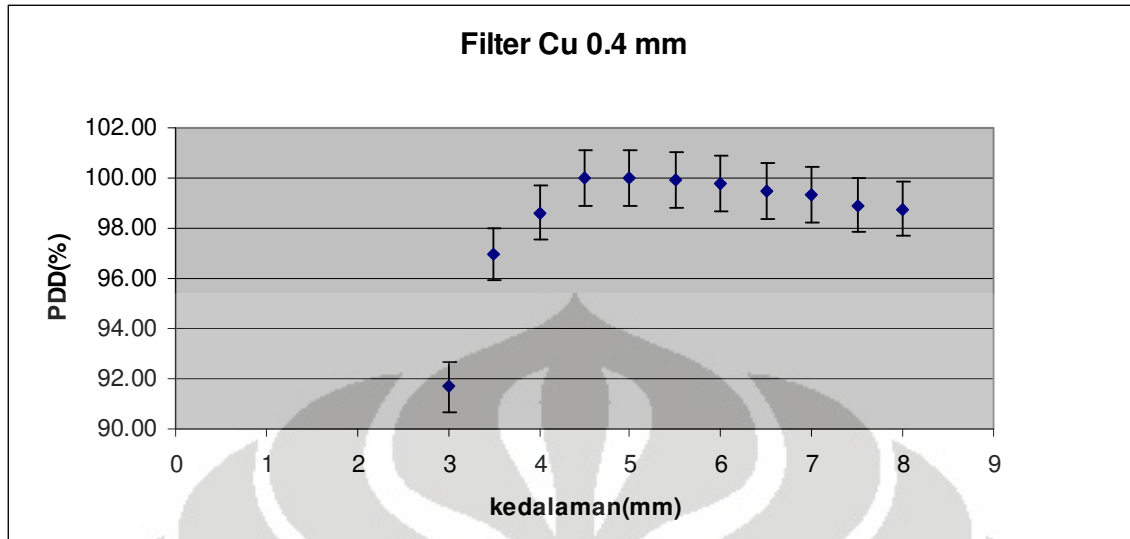
Filter Al 1,2 mm

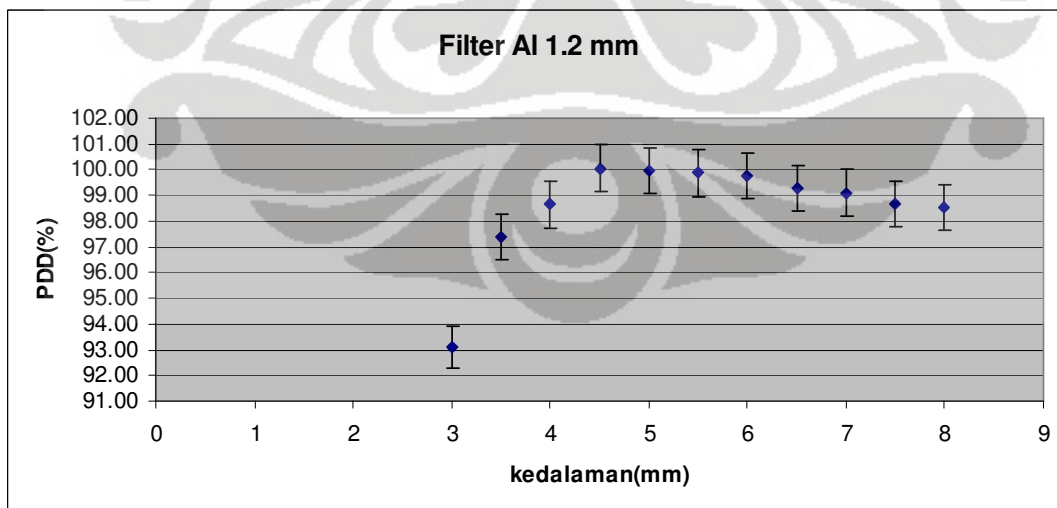
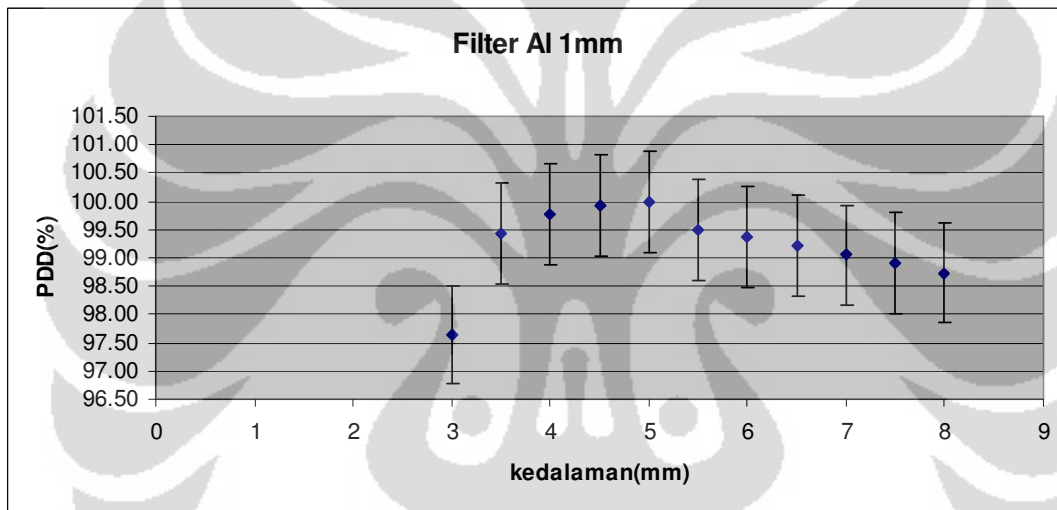
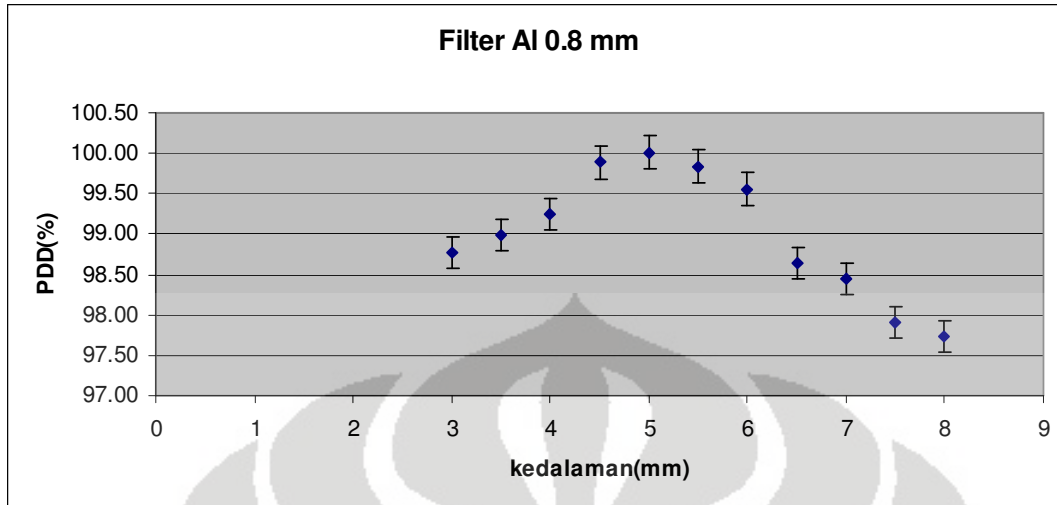
| No. | Kedalaman (mm) | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 100 | 200 |
| 1 | 3.904 | 3.931 | 3.929 | 3.92 | 3.908 | 3.898 | 3.893 | 3.883 | 3.875 | 3.867 | 3.856 | 2.398 | 1.316 |
| 2 | 3.905 | 3.933 | 3.93 | 3.921 | 3.907 | 3.897 | 3.892 | 3.883 | 3.876 | 3.865 | 3.854 | 2.399 | 1.317 |
| 3 | 3.905 | 3.933 | 3.93 | 3.92 | 3.908 | 3.898 | 3.892 | 3.883 | 3.876 | 3.867 | 3.856 | 2.399 | 1.317 |

LAMPIRAN 5

Grafik hubungan *PDD* dengan kedalaman pada daerah *build up* untuk lapangan radiasi $4 \times 4 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm dengan lama penyinaran 1 menit dengan berbagai filter.

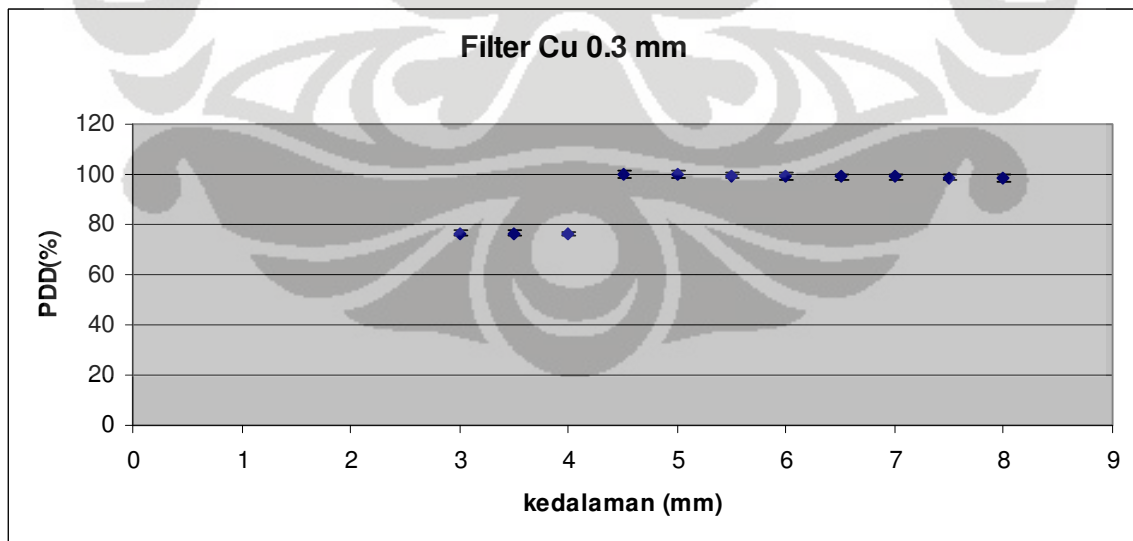
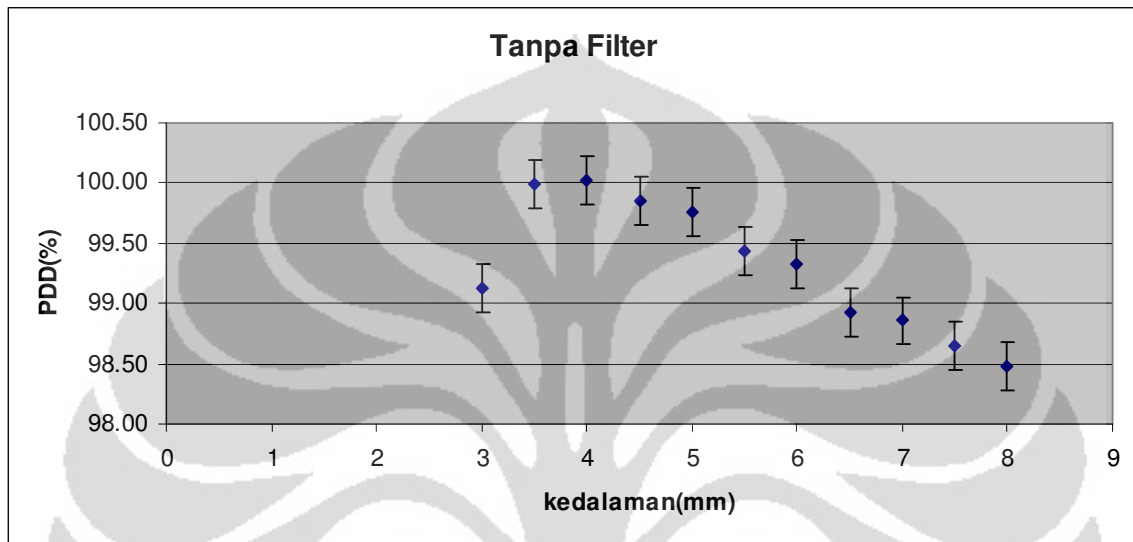


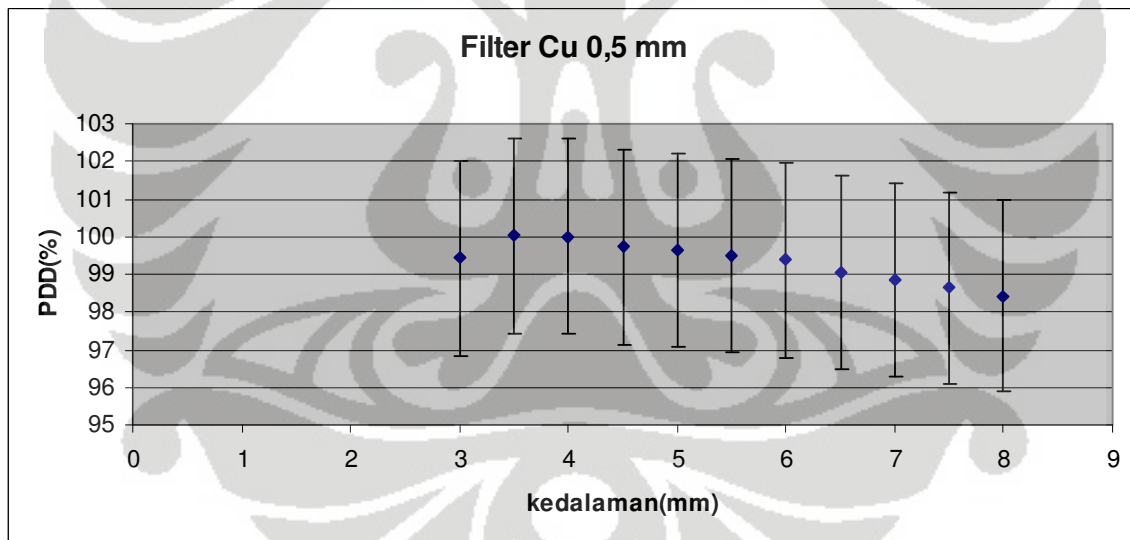
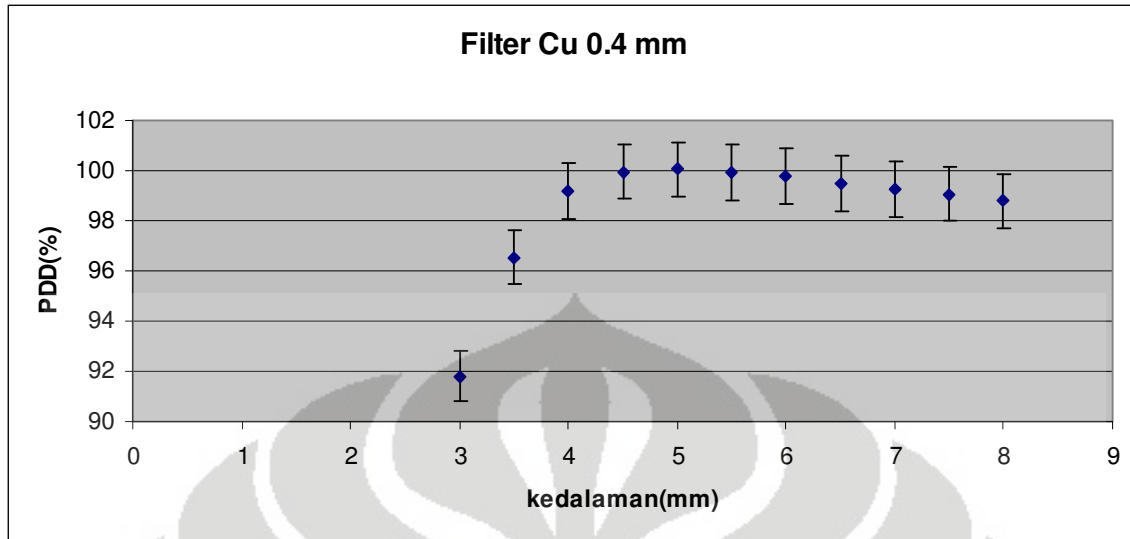


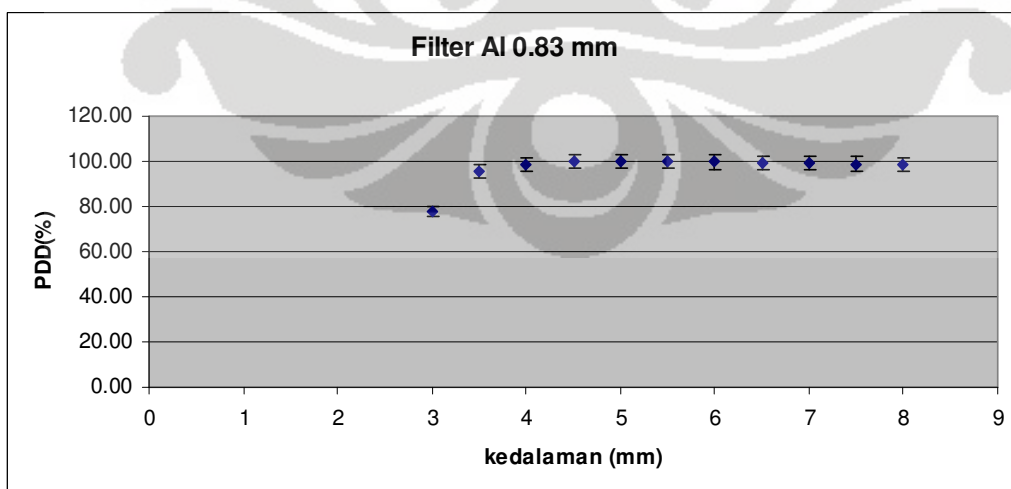
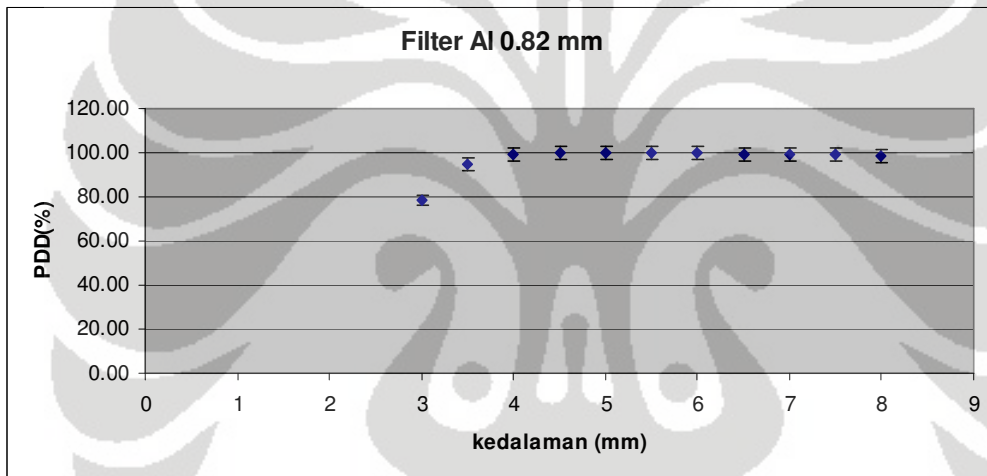
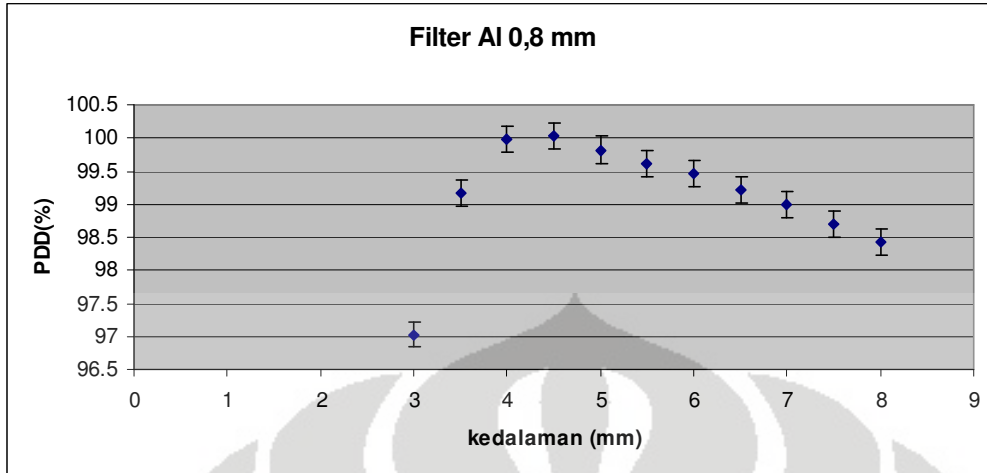


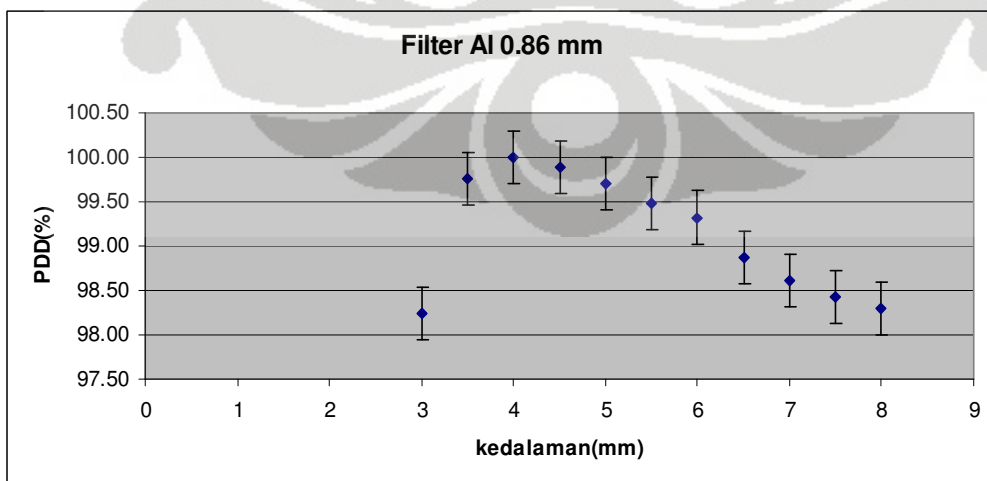
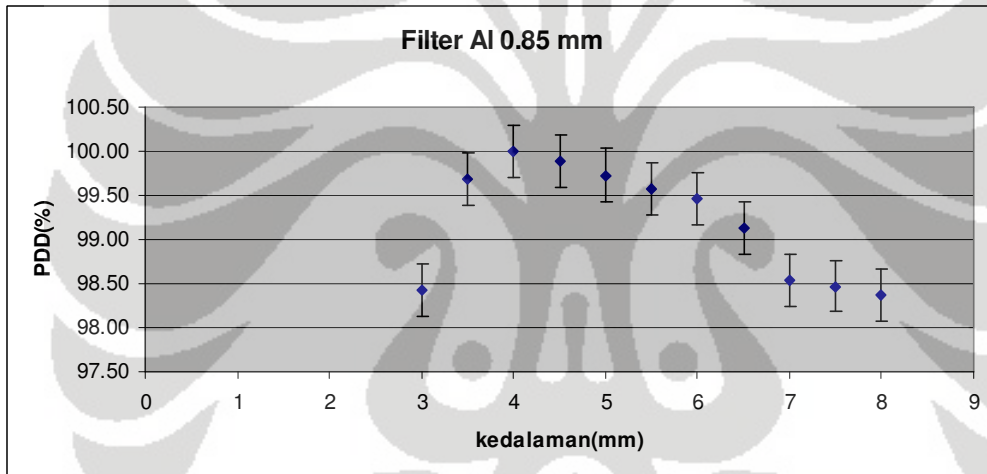
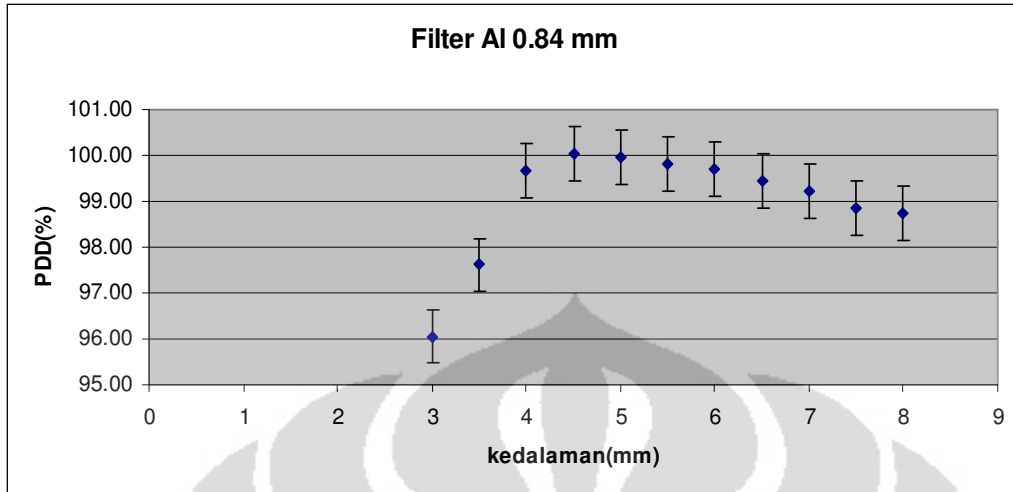
LAMPIRAN 6

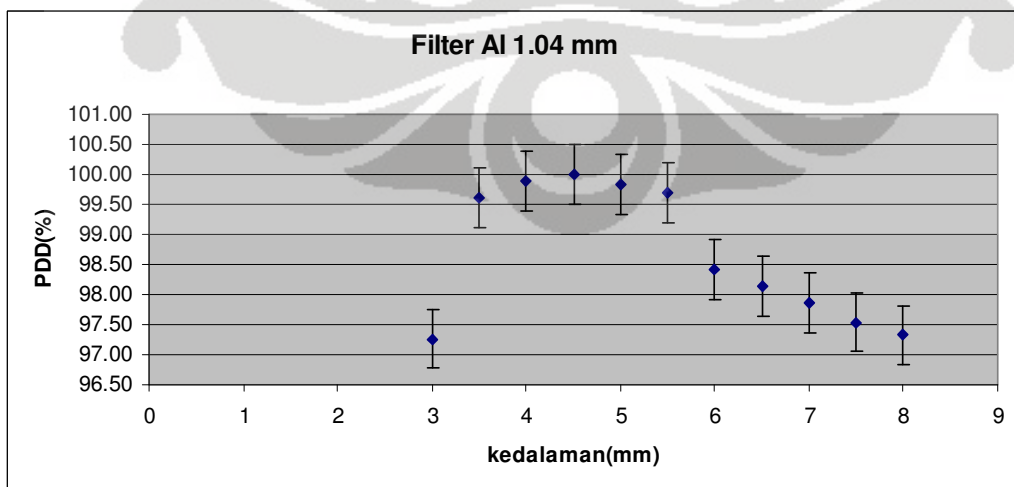
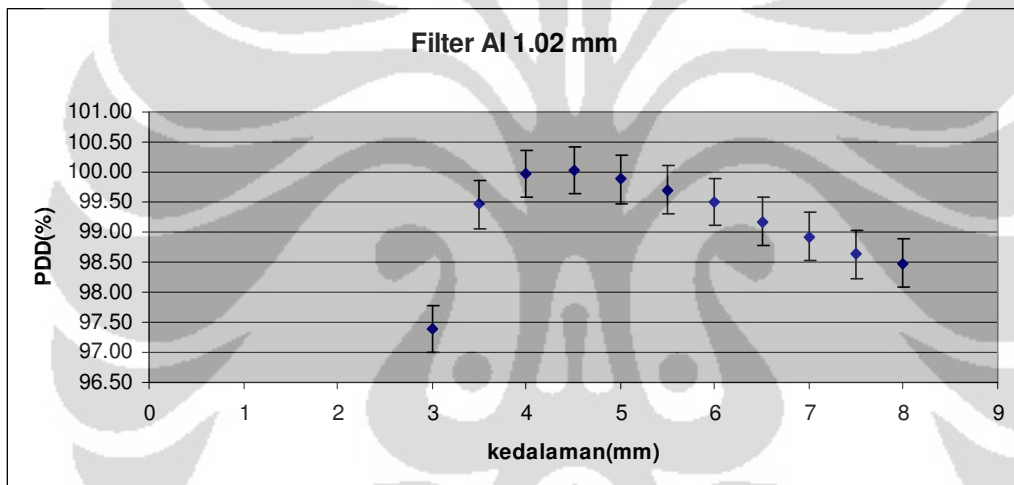
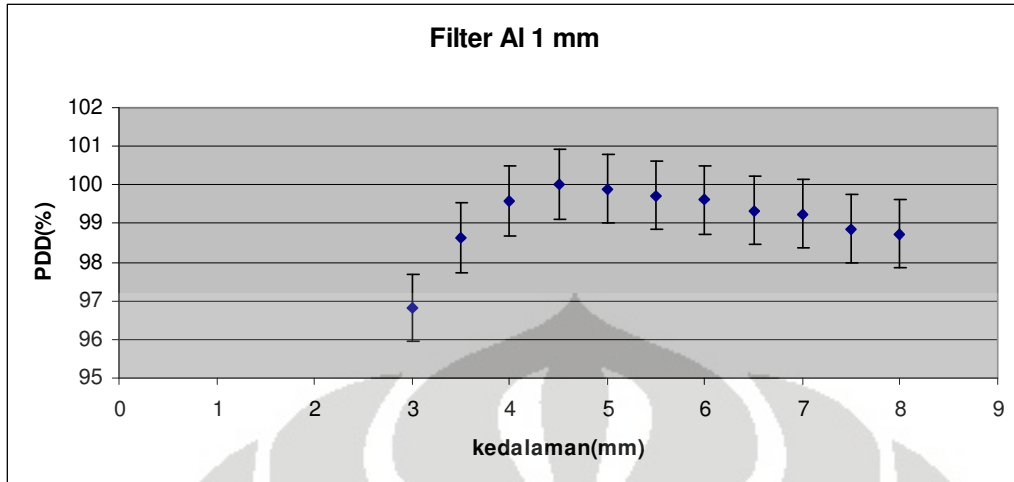
Grafik hubungan *PDD* dengan kedalaman pada daerah *build up* untuk lapangan radiasi $10 \times 10 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm dengan lama penyinaran 1 menit dengan berbagai filter.

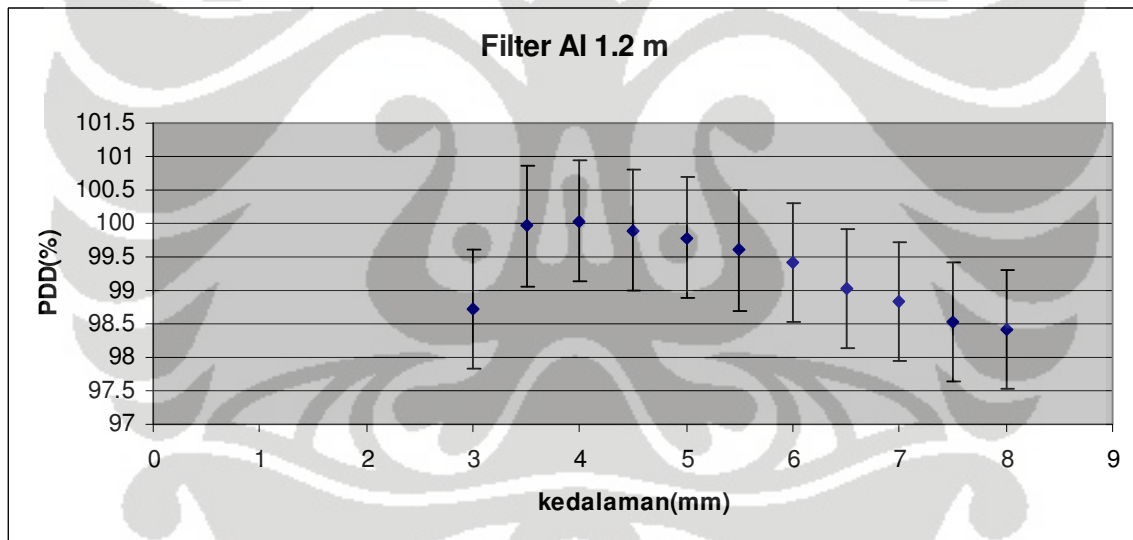
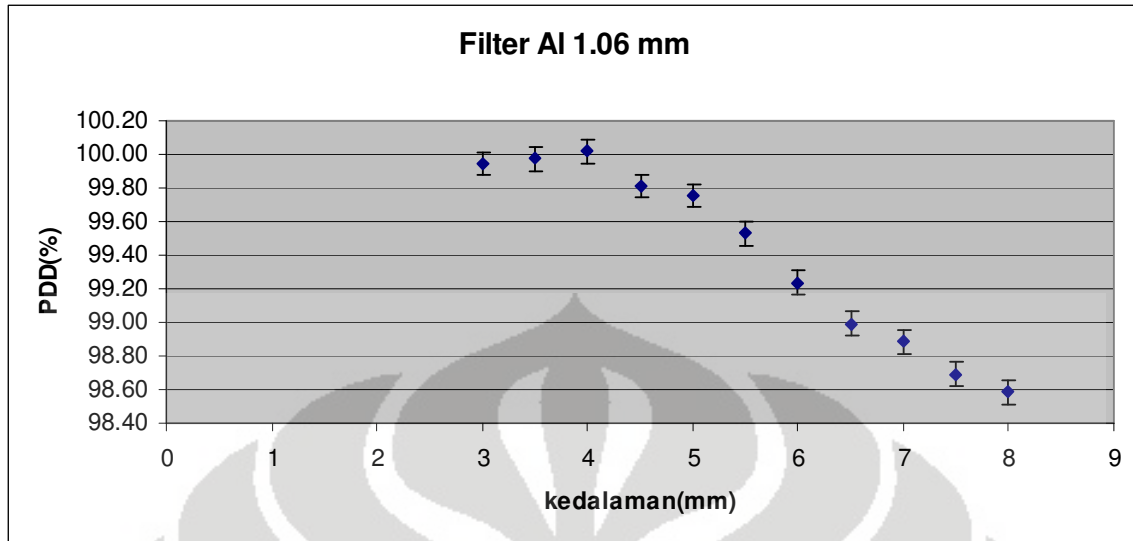












LAMPIRAN 7

Grafik hubungan *PDD* dengan kedalaman pada daerah *build up* untuk lapangan radiasi $30 \times 30 \text{ cm}^2$, *SSD* 80 cm dengan lama penyinaran 1 menit dengan berbagai filter.

