

Skripsi Fisika

**PENENTUAN NILAI HVL (*HALF VALUE LAYER*) DARI PLAT
ALUMINIUM DENGAN VARIASI KETEBALAN FILTER
MENGUNAKAN PESAWAT LINAC (*LINEAR ACCELERATOR*)
DENGAN METODE EKSTRAPOLASI**

YUDI PALINGGI

H211 12 287



**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2017**

Skripsi Fisika

**PENENTUAN NILAI HVL (*HALF VALUE LAYER*) DARI PLAT
ALUMINIUM DENGAN VARIASI KETEBALAN FILTER
MENGUNAKAN PESAWAT LINAC (*LINEAR ACCELERATOR*)
DENGAN METODE EKSTRAPOLASI**

YUDI PALINGGI

H211 12 287



**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2017**

**Penentuan Nilai HVL (*Half Value Layer*) Dari Plat Aluminium Dengan
Variasi Ketebalan Filter Menggunakan Pesawat Linac (*Linear Accelerator*)
Dengan Metode Ekstrapolasi**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat

Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)

Pada Program Studi Fisika Jurusan Fisika

Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

YUDI PALINGGI

H211 12 287

PROGRAM STUDI FISIKA

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2017

Lembar Pengesahan

**Penentuan Nilai HVL (*Half Value Layer*) Dari Plat Aluminium Dengan
Variasi Ketebalan Filter Menggunakan Pesawat Linac (*Linear Accelerator*)
Dengan Metode Ekstrapolasi**

Disusun Oleh:

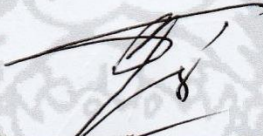
Yudi Palinggi

H211 12 287

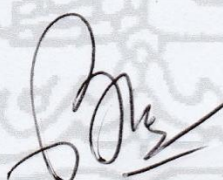
Disetujui Oleh:

Makassar, Februari 2017

Pembimbing Utama


Prof. Dr. Syamsir Dewang, M.Eng, Sc
NIP. 196301111990021001

Pembimbing Pertama


Bannu, S.Si., M.Si
NIP. 197305021998021002

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa Skripsi ini merupakan karya Orisinal saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau telah tertulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk suatu gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan tinggi lainnya di manapun kecuali bagian yang telah dikutip sesuai dengan kaidah ilmiah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil kerja saya sendiri dan dalam batas tertentu dibantu oleh pihak pembimbing.

PENULIS

Yudi Palinggi

INTISARI

Telah dilakukan penelitian untuk menghitung nilai HVL (*Half Value Layer*) menggunakan variasi ketebalan filter aluminium pada pesawat Linac (*Linear Accelerator*) dengan metode ekstrapolasi. Penelitian ini dilakukan dengan dua tahap yaitu tahap pertama dengan pengambilan data primer berupa pengukuran langsung dan tahap kedua yaitu melakukan ekstrapolasi data primer hasil pengukuran langsung untuk menentukan nilai HVL dan nilai koefisien atenuasi dari filter aluminium. Hasil dari penelitian ini diperoleh nilai HVL pada energi 6 MV yaitu 3.85 cm, sedangkan nilai HVL pada energi 10 MV yaitu 5.95 cm. Nilai koefisien atenuasi linear (μ) dari filter aluminium pada energi 6 MV yaitu 0.18 cm^{-1} sedangkan pada energi 10 MV yaitu 0.107 cm^{-1} . Nilai HVL dan nilai koefisien atenuasi linear (μ) yang diperoleh sesuai dengan nilai standar dari bahan yang digunakan.

Kata kunci: HVL (*Half Value Layer*), Linac (*Linear Accelerator*), Filter Aluminium, Ekstrapolasi

ABSTRACT

The research had been done by determine the HVL (Half Value Layer) using aluminium filter thickness variation of Linac (Linear Accelerator) by extrapolation method. This research was conducted in two phases: the first step is primary data collection form direct measurements and the second stage is extrapolate the primary data of direct measurements to determine the HVL and attenuation coefficient of aluminum filter. The results of HVL value was 3.85 cm at 6 MV of energy , while the HVL value at 10 MV of energy was 5.95 cm. The value of the linear attenuation coefficient (μ) of the aluminum filter at 6 MV of energy was 0.18 cm^{-1} whereas at 10 MV of energy was 0.107 cm^{-1} . The value of HVL and linear attenuation coefficient (μ) was obtained appropriate by the standar value.

Keywords: HVL (Half Value Layer), Linac (Linear Accelerator), aluminium filter, extrapolation

KATA PENGANTAR

Salam Sejahterah....

Puji dan syukur hanya bagi Tuhan Yesus Kristus Sang Juruselamat, oleh karena anugerah-Nya yang melimpah serta kasih setia dan penyertaan-Nya yang besar sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **Penentuan Nilai HVL (*Half Value Layer*) Dari Plat Aluminium Dengan Variasi Ketebalan Filter Menggunakan Pesawat Linac (*Linear Accelerator*) Dengan Metode Ekstrapolasi**. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Skripsi ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua terkasih (**Yusuf Tappi**' dan **Yuliana**) yang selalu memberikan kasih sayang, semangat, perhatian dan dukungan baik secara moral maupun secara materi kepada penulis. Terima kasih telah meluangkan waktu untuk mendidik, membimbing serta mendengar keluh kesah penulis selama ini. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada adik-adik terkasih **Edwin Palinggi** serta kepada si bungsu **Satri Restu Palinggi** yang selalu merasa lebih dahulu lahir dari pada kakak-kakaknya.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. H. Syamsir Dewang, M.Eng, Sc** selaku pembimbing utama dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih atas setiap waktu, motivasi, dorongan, nasehat dan ilmu yang diberikan kepada penulis. Terima kasih juga

atas kepercayaan yang diberikan kepada penulis untuk bisa mengakses penuh ruangan Labortorium Fisika Optik dan Spektroskopi jurusan Fisika.

2. Bapak **Bannu, S.Si, M.Si** selaku pembimbing pertama. Terima kasih atas setiap saran, motivasi serta ilmu yang diberikan kepada penulis.
3. Bapak **Dr. Eng Amiruddin, S.Si, M.Si** selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Dr. Tasrief Surungan, M.Sc** selaku ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
5. Bapak **Prof. Dr. Dahlang Tahir, PhD**, bapak **Prof. Dr. H. Halmar Halide, M.Sc** dan bapak **Dr. Bualkar Abdullah, M.Eng.Sc** selaku dosen dan penguji skripsi. Terima kasih atas setiap saran dan nasehat kepada penulis.
6. Bapak **Drs. Bansawang BJ, M.Si** selaku penasehat akademik penulis. Terima kasih atas setiap bimbingan, saran dan nasehat kepada penulis selama masa perkuliahan.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Fisika atas setiap ilmu yang boleh diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan.
8. Bapak **Satrial Male, S.Si, M.Si** selaku pembimbing lapangan. Terima kasih atas waktu dan kesediaannya membantu penulis selama proses penelitian.
9. Bapak **Abdul Latif, S.Sos**, bapak **Muhammad Ali** dan bapak **H. Ambo Tuo** selaku staf akademik jurusan Fisika. Terima kasih atas bantuannya kepada penulis terutama dalam pengurusan persuratan. Terima kasih juga kepada bapak **Bachtiar S.Sos**, bapak **Sangkala'** dan bapak **Suardi, S.Sos** atas bantuannya selama penulis pengurusan administrasi di tingkat fakultas.

Terima kasih juga kepada bapak **Taufik** selaku staf di *Science Building* yang selalu membantu penulis dalam proses peminjaman bahan penelitian.

10. Pegawai dan staf Radiologi Rumah Sakit Stella Maris Makassar. Terima kasih atas ilmu dan kebersamaannya selama masa PKL Fisika Medik.
11. Kanda **Ev. Demingus Daniel Maliama** atas setiap motivasi, nasehat, serta bimbingan kepada penulis selama masa perkuliahan.
12. Segenap keluarga besar yang senantiasa memberikan semangat, nasehat dan dukungan baik secara moral maupun materi kepada penulis, secara khusus kepada keluarga **Lukas Laba** yang telah menjadi wali bagi penulis di Makassar.
13. Teman-teman angkatan **Fisika 2012** atas setiap kerja sama dan canda tawa selama masa perkuliahan.
14. Kanda-kanda **Fisika 2010 dan 2011** serta adik-adik Jurusan **Fisika 2013 dan 2014**. Terima kasih atas setiap kebersamaannya.
15. Keluarga besar **GMKI Komisariat FMIPA Unhas**. Terima kepada kakak-kakak dan adik-adik atas setiap kebersamaannya, secara khusus kepada rekan-rekan sepelayanan **Pengurus Masa Bakti 2015-2016** yang begitu luar biasa. Terima kasih atas canda tawa dan kebersamaannya selama masa kepengurusan.
16. Teman KKN Gelombang 93 / 2016 Universitas Hasanuddin Kabupaten Wajo, Kecamatan Pitumpanua Desa Botto Tengnga.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan baik dari segi isi maupun segi penulisan, maka dari itu kritik dan saran yang

membangun sangat diperlukan untuk penyusunan karya ilmiah berikutnya. Akhir kata semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pembaca. Sekian dan terima kasih, Tuhan Yesus memberkati.

Makassar, Februari 2017

Yudi Palinggi

MOTTO

*Serahkan perbuatanmu kepada Tuhan maka terlaksanalah segala
rencanamu*

Amsal 16:3

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGAJUAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
MOTTO	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup Penelitian	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Linear Accelerator	4
II.2 Generasi Linear Accelerator	5
II.3 Komponen Linear Accelerator	6
II.4 Prinsip Kerja Pesawat <i>Linear Accelerator</i>	10
II.5 Atenuasi Berkas Foton	11
II.6 Koefisien Atenuasi Bahan	13

II.7 HVL (Half Value Layer)	13
II.8 Metode Extrapolasi.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
III.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	18
III.2 Alat dan Bahan.....	18
III.3. Prosedur Penelitian.....	19
III.3.1 Pengambilan Data	19
III.3.2 Ekstrapolasi Data	19
III.3.3 Analisis Data	20
III.4 Bagan Alir Penelitian	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22
IV.1 Hasil Pengukuran	22
IV.2 Pembahasan.....	25
IV.2.1 Data Hasil Ekstrapolasi.....	25
IV.2.2 Nilai HVL	26
IV.2.3 Koefisien Atenuasi Linear (μ) Bahan	28
BAB V PENUTUP.....	30
V.1 Kesimpulan	30
V.2 Saran.....	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN.....	34

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Tabel IV.1 Data Primer Hasil Pengukuran pada Energi 6 MV dengan Variasi Ketebalan Filter	23
2. Tabel IV.2 Data Primer Hasil Pengukuran pada Energi 10 MV dengan Variasi Ketebalan Filter	24

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Gambar II.1 Penampang Melintang Yang Menunjukkan Prinsip Kerja Magnetron	6
2. Gambar II.2 Penampang Rongga Klystron	7
3. Gambar II.3 Model Berkas Elektron	8
4. Gambar II.4 <i>Treatment Head</i> Pesawat Radioterapi Linac	9
5. Gambar II.5 Blok Diagram <i>Linear Accelerator</i>	11
6. Gambar II.6 Transmisi Berkas Foton	12
7. Gambar II.7 Nilai Koefisien Atenuasi Bahan pada Rentang Energi Dalam Satuan MeV	13
8. Gambar II.8 Perbandingan Antara Intensitas Dengan Tebal Material Penyerap	14
9. Gambar II.9 Ekstrapolasi Linear	17
10. Gambar III.1 Fungsi Statistik <i>Forecast</i> di Microsoft Excel 2010 Untuk Melakukan Ekstrapolasi Data	20
11. Gambar III.2 Bagan Alir Penelitian	21
12. Gambar IV.1 Grafik Cacahan Energi Terhadap Ketebalan Filter pada Energi 6 MV	25
13. Gambar IV.2 Grafik Cacahan Energi Terhadap Ketebalan Filter pada Energi 10 MV	26
14. Gambar IV.3 Grafik yang menunjukkan nilai HVL Pada Energi 6 MV	27

15. Gambar IV.4 Grafik yang menunjukkan nilai HVL
pada Energi 10 MV 27

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895 membawa manfaat besar pada era modern terutama dalam bidang kedokteran. Pemanfaatan sinar-X dalam bidang kedokteran merupakan salah satu cara untuk menunjang kesehatan masyarakat agar lebih baik. Aplikasi ini beragam mulai dari penggunaan radiasi untuk diagnostik hingga radiasi untuk terapi^[1].

Kualitas dari sebuah pesawat radiodiagnostik dan radioterapi menggunakan sumber radiasi sinar-X ditandai dengan kemampuan berkas yang dihasilkan untuk menembus suatu material. Salah satu cara untuk mengetahui kualitas berkas keluaran sinar-X adalah metode HVL (*Half Value Layer*) atau lapisan nilai setengah dimana jumlah radiasi yang keluar melalui filter / plat aluminium (Al) atau tembaga (Cu) bernilai setengah dari radiasi awal. Metode ini dilakukan untuk menghindari radiasi langsung yang diterima oleh pasien agar tidak mengganggu jaringan normal di sekitar objek yang akan disinari^[2,3,4].

Pengukuran nilai HVL pada pesawat radioterapi Linac (*Linear Accelerator*) merupakan metode untuk melakukan kalibrasi terhadap energi rendah yang dihasilkan oleh tabung (di bawah 0.5 MeV) dan tempat produksi elektron Linac (di bawah 10 MeV). Kualitas sinar-X dan berkas dari pesawat radioterapi bergantung pada pengaturan tegangan dan filtrasi dari tabung. Dampak filtrasi dari tabung dapat dilihat pada energi efektif yang diterima oleh pasien yang diberi paparan radiasi^[3,5].

Pesawat radioterapi Linac memiliki energi yang sangat tinggi yaitu dalam satuan MV. Pengukuran nilai HVL yang akan dilakukan tentunya akan mengalami kendala karena membutuhkan filter material yang banyak. Adanya kendala berupa filter material yang kurang, maka dapat dilakukan suatu metode untuk memprediksikan nilai HVL dari sebuah bahan yaitu melalui metode ekstrapolasi.

Penelitian mengenai HVL telah dilakukan oleh Li, dkk (2011) dengan menggunakan detektor Cerenkov untuk menghitung nilai lapisan setengah dari pesawat Linac (*Linear Accelerator*). Penelitian tersebut digunakan plat besi dengan ketebalan 6 mm dengan menggunakan variasi berkas radiasi dari 2 MeV hingga 9 MeV. Hasil penelitian tersebut diperoleh data yaitu, ketika energi yang diberikan adalah 3 MeV diperoleh nilai HVL 14.71 mm dan pada energi 6 MeV diperoleh nilai HVL 17.01 mm. Dari penelitian tersebut terlihat, apabila semakin besar berkas radiasi yang dilepaskan dari tabung untuk menumbuk filter dengan ketebalan yang sama maka nilai HVL juga akan meningkat^[5].

Penelitian mengenai HVL juga telah dilakukan oleh Meli (1985) dengan menggunakan plat aluminium sebagai filter menggunakan sinar-X pada energi 4 MV, 6 MV, 10 MV dan 25 MV. Hasil penelitian tersebut diperoleh data, yaitu pada energi 4 MV diperoleh nilai HVL 5.5 cm, pada energi 6 MV diperoleh nilai HVL 6.1 cm, pada energi 10 MV diperoleh nilai HVL 7.5 cm dan pada energi 25 MV diperoleh nilai HVL 8.7 cm^[6].

Pengembangan dari penelitian tersebut adalah menentukan nilai HVL secara ekstrapolasi hasil pengukuran langsung dari bahan aluminium (Al) sebagai filter

dengan menggunakan detektor *Rose Chamber* untuk mengukur radiasi yang diterima yang terhubung dengan *Solid Water Phantom*.

I.2 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini adalah menentukan HVL dari bahan aluminium dengan metode ekstrapolasi menggunakan pesawat *Linear Accelerator* pada energi 6 MV dan 10 MV.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menentukan nilai HVL dengan variasi ketebalan filter plat aluminium menggunakan pesawat radioterapi Linac dengan metode ekstrapolasi
2. Menentukan nilai koefisien atenuasi linear (μ) dari filter yang digunakan.
3. Membandingkan nilai HVL yang diperoleh melalui metode ekstrapolasi dengan hasil metode pengukuran langsung.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 *Linear Accelerator*

Linear accelerator (Linac) adalah pesawat radioterapi yang menggunakan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tinggi untuk mempercepat partikel bermuatan seperti elektron melalui tabung linear. Energi tinggi yang dihasilkan dapat digunakan untuk membunuh sel-sel tumor pada penderita kanker. Linac akan memberikan dosis yang seragam dengan energi foton yang tinggi pada area yang terkena tumor. Proses ionisasi antara berkas elektron dan foton dengan jaringan kanker akan membuat rantai DNA tumor tersebut terputus sehingga jaringan kanker tersebut akan mati^[7,10,20].

Pesawat Linac mengakselerasi elektron dengan energi kinetik pada rentang 4 hingga 25 MeV menggunakan gelombang micro RF dengan frekuensi 10^3 MHz (L band) hingga 10 MHz (X band) dengan luas operasi sebagian besar pada 2856 MHz (S band). Elektron akan diakselerasi pada lintasan lurus melalui jalur khusus yang disebut akselerasi pandu gelombang. RF dengan daya yang tinggi untuk mempercepat pandu gelombang disebut magnetron dan klystron^[8].

Terdapat beberapa jenis Linac yang bisa digunakan untuk penggunaan klinis. Beberapa memberikan energi yang rendah (4 atau 6 MV), dan ada yang menyediakan sinar-X dan elektron dalam rentang energi megavoltage. Pada Linac yang modern memberikan energi foton yang tinggi yaitu 6 dan 18 MV dengan energi elektron 6 sampai 22 MeV^[8,11].

II.2 Generasi *Linear Accelerator*

Sejak ditemukan hingga sekarang, Linac telah melewati lima generasi, dimana setiap perubahan generasi selalu ditambahkan fitur-fitur baru^[8].

1. Foton energi rendah (4-8 MV): berkas lurus, filter tetap, irisan eksternal, *single transmission ionization chamber*, dan bantalan isosentrik.
2. Foton energi sedang (10-15 MV) dan elektron: berkas dapat dibelokkan, objek dapat digerakkan, ionisasi ganda dalam ruang dan elektron yang berbentuk kerucut.
3. Foton energi tinggi (18-25 MV) dan elektron: energi foton yang ganda dengan energi elektron, kelenturan magnet otomatis, hamburan foil yang ganda, berkas elektron menyerupai pensil, dan kolimator yang asimetris atau independen.
4. Foton energi tinggi dan elektron: sistem kontrol dikendalikan melalui komputer, irisan dinamis, *electronic portal imaging device (EPID)*, *multi leaf collimator (MLC)*.
5. Foton energi tinggi dan elektron: intensitas sinar foton modulasi dengan MLC, pengiriman dosis konformal dinamis penuh dengan intensitas berkas termodulasi diproduksi dengan MLC.

Umumnya pesawat Linac dipasang secara eksentrik dengan sistem operasional yang dibagi dalam lima bagian besar yaitu ^[7,18]:

1. Gantry
2. Penopang gantry
3. Lemari modulator

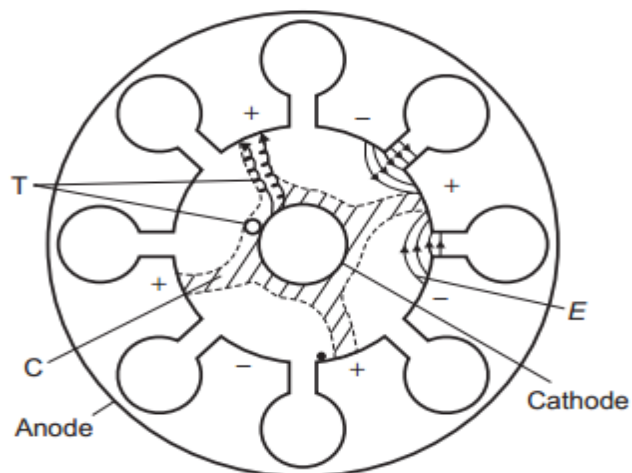
4. Meja pasien dan alat bantu
5. Ruang kontrol

II.3 Komponen *Linear Accelerator*

1. Magnetron

Magnetron adalah perangkat yang berfungsi untuk menghasilkan gelombang mikro dan sebagai osilator untuk daya yang tinggi untuk, membangkitkan gelombang mikro dalam satuan waktu mikro detik.

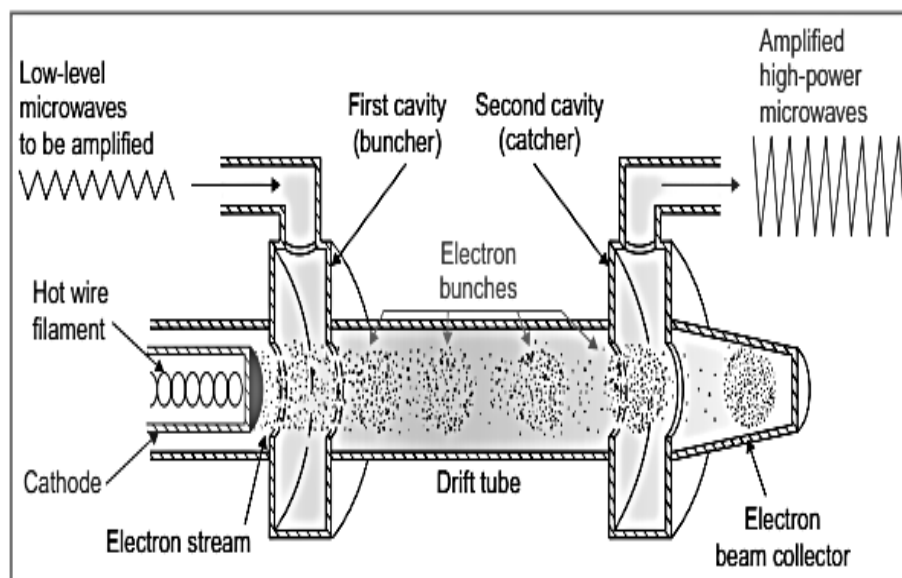
Magnetron berbentuk silinder, memiliki katoda di pusat dan anoda yang dilindungi oleh tembaga. Magnetron beroperasi pada daya 2 MW untuk Linac dengan energi rendah (kurang dari 6 MV). Gambar II.1 menunjukkan penampang melintang dari Magnetron. Pengaruh simultan dari medan magnet membuat elektron bergerak secara spiral melalui rongga resonansi sambil memancarkan gelombang mikro^[13].



Gambar II.1 Penampang Melintang Yang Menunjukkan Prinsip Kerja Magnetron (Khan, 2010)

2. Klystron

Klystron berfungsi sebagai penguat gelombang mikro yang dihasilkan oleh magnetron. Elektron yang dihasilkan oleh katoda dipercepat oleh pulsa tegangan negatif pada rongga pertama yang akan didorong oleh gelombang mikro yang ada. Kecepatan elektron akan diubah oleh medan listrik yang dikenal sebagai modulasi kecepatan. Adanya induksi di ujung rongga membuat elektron kehilangan kecepatan. Ketika terjadi perlambatan, energi kinetik dari elektron diubah menjadi gelombang mikro dengan daya yang tinggi^[7,13].



Gambar II.2 Penampang Rongga Klystron (Khan, 2010)

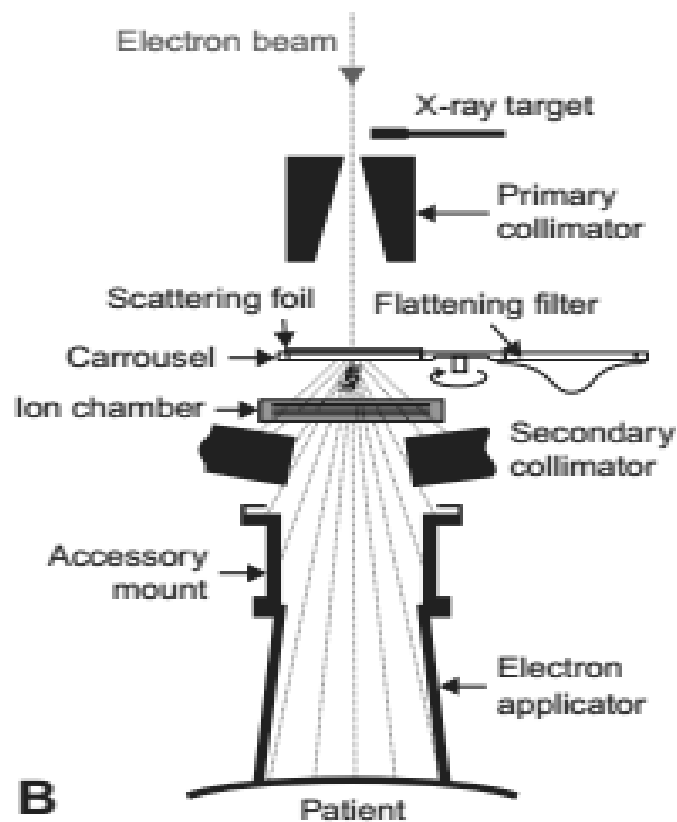
3. Berkas Radiasi Sinar-X Linac

Sinar-X Bremsstrahlung terjadi apabila elektron dengan kecepatan tinggi menumbuk suatu material dengan nomor atom yang tinggi seperti

tungsten. Hasil dari interaksi yang terjadi adalah energi elektron akan diubah menjadi spektrum sinar-X dimana energi maksimum sama dengan energi tumbukan elektron^[14].

4. Berkas Elektron

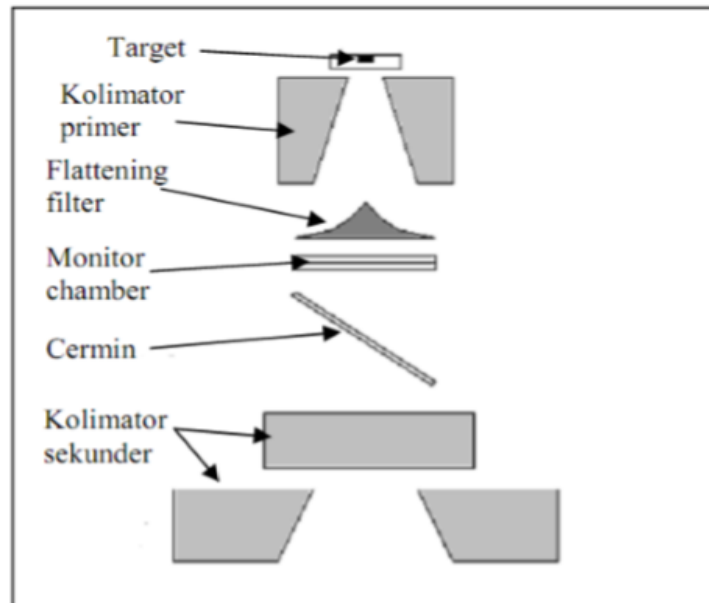
Berkas elektron yang keluar dari tabung akselerator melewati celah sempit seperti pensil dengan diameter tiga mm. Dalam pengoperasian Linac, elektron akan menumbuk foil sehingga menyebabkan terjadinya *fluence* elektron yang berguna untuk pengobatan. Foil biasanya memiliki nomor atom yang tinggi tetapi juga dibutuhkan foil dengan nomor atom yang rendah untuk meminimalisir produksi Bremsstrahlung^[7,13,15].



Gambar II.3 Model Berkas Elektron (Khan, 2010)

5. Treatment Head

Bagian kepala dari pesawat Linac terdiri dari *high-density shielding*, tungsten, foil, ruang ion, kolimator, filter, dan sistem pengaturan cahaya^[13].



Gambar II.4 Treatment Head Pesawat Radioterapi Linac (Khan, 2010)

6. Target dan Filter

Distribusi sinar-X akibat adanya tumbukan dengan elektron menyebabkan arah sinar-X bergerak maju. Untuk membuat intensitas merata di setiap sisi maka akan diberikan filter yang terbuat dari timah atau aluminium^[16,17].

7. Kolimasi berkas dan pemantauan

Berkas yang akan digunakan untuk menyinari objek awalnya harus dikolimasi oleh kolimator yang berada di luar target. Setelah dikolimasi, berkas akan melewati filter untuk mengurangi radiasi yang berlebihan

(Gambar II.4)^[19]. Kolimator dapat diatur pada ukuran 0 x 0 sampai 40 x 40 cm dengan jarak proyeksi sumber dengan target sekitar 100 cm. Luas kolimasi berkas disesuaikan dengan lokasi pengobatan. Kolimasi yang tidak sesuai dapat memberikan radiasi hambur yang berlebihan sehingga menyebabkan kerusakan pada organ yang normal^[7,13].

8. Gantry

Linear accelerator dirancang dengan kemampuan untuk menghasilkan radiasi yang dapat memutar secara horizontal dengan sumbu kolimator dapat bergerak di bidang vertikal. Persimpangan sumbu kolimator dengan rotasi gantry dikenal sebagai isosenter^[7,13].

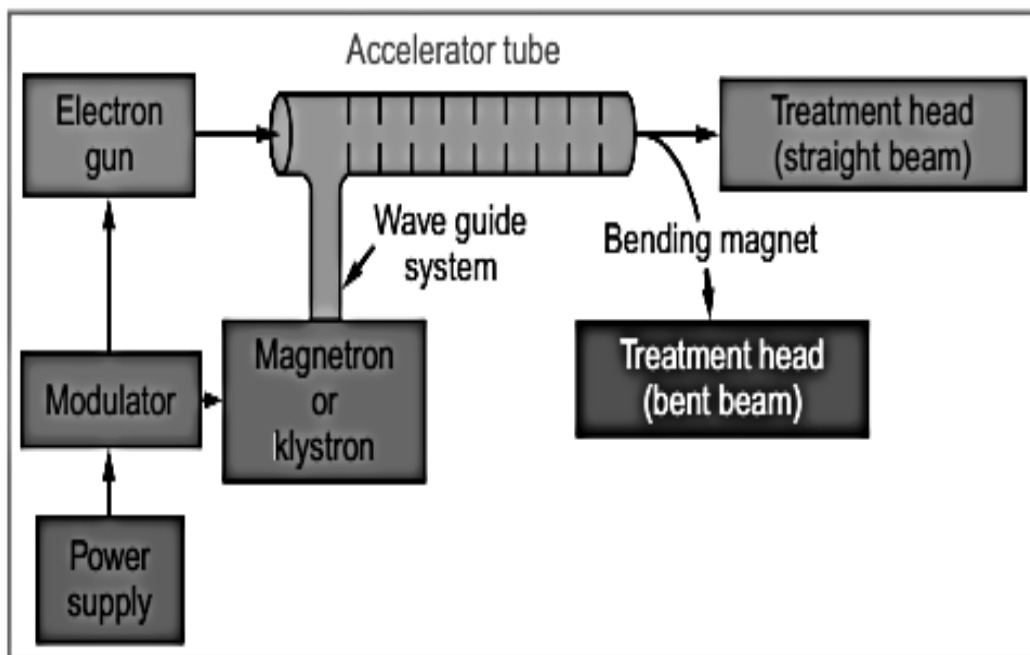
II.4 Prinsip Kerja Pesawat *Linear Accelerator*

Linear Accelerator dapat menghasilkan radiasi elektron dan foton dengan energi yang tinggi. Energi elektron bervariasi mulai dari 4 MeV hingga 22 MeV dengan energi foton 6 MV dan 10 MV^[11].

Pada saat Linac sudah dalam kondisi *ON* berarti modulator telah memberi daya berupa pulsa-pulsa tegangan tinggi ke Klystron atau Magnetron. Selanjutnya gelombang mikro energi tinggi yang dihasilkan klystron atau magnetron melalui *wave guide* akan bergerak maju menuju *accelerator tube*. Elektron akan diinjeksikan ke *accelerator tube* dan diberikan energi tinggi berupa gelombang mikro sehingga elektron mempunyai tenaga kinetik. Dengan adanya medan listrik yang tinggi maka elektron akan dipercepat ke ujung tabung kemudian magnet akan mempercepat elektron tersebut serta membelokkan dengan sudut 90° atau 270°, dengan demikian akan diperoleh elektron berkekuatan tinggi yang

menumbuk target (misalnya terbuat dari tungsten) dan selanjutnya menghasilkan foton yang sangat tinggi. Apabila yang diinginkan adalah berkas elektron maka elektron berkekuatan tinggi tersebut langsung diarahkan ke celah berkas tanpa menumbuk target (Gambar II.5)^[7].

Foton energi tinggi dapat berupa foton sinar-X (*photon beam*) dan berkas elektron. Untuk mendapatkan berkas sesuai dengan yang diinginkan misalnya berkas elektron maka tumbol energi MeV yang ditekan sesuai dengan kebutuhan *range* energi, sedangkan untuk berkas sinar-X maka tumbol energi MV yang ditekan^[11].

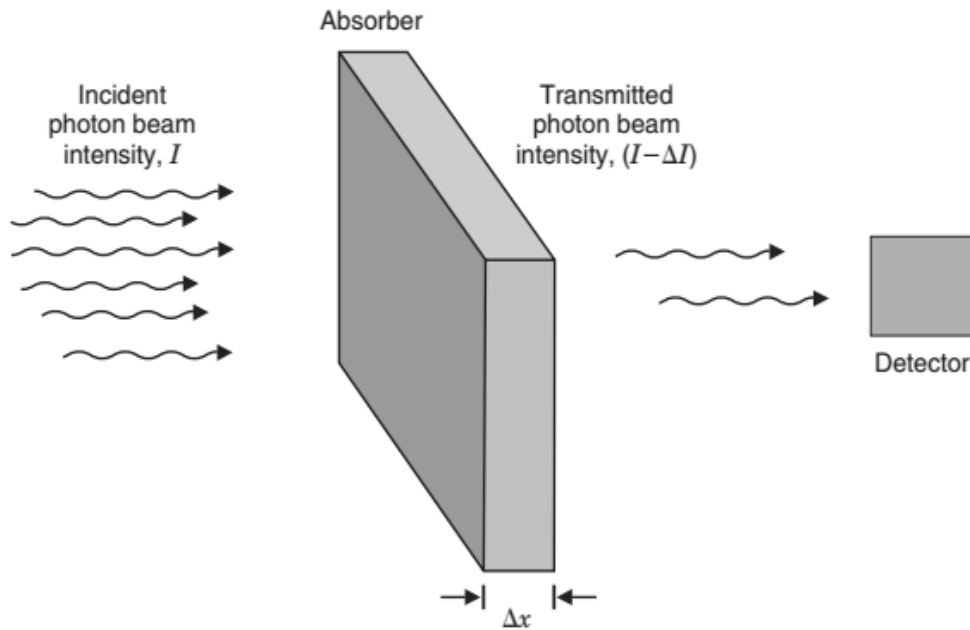


Gambar II.5 Blok Diagram *Linear Accelerator* (Khan, 2010)

II.5 Atenuasi Berkas Foton

Ketika foton melewati suatu material maka kemungkinan besar akan mengalami interaksi dengan bahan tersebut (x). Adapun interaksi tersebut akan

dipengaruhi oleh energi foton dan komposisi material dari bahan penyerap. Setelah melewati material penyerap, intensitas radiasi menjadi berkurang tergantung ketebalan dari material yang dilalui^[21].



Gambar II.6 Transmisi Berkas Foton (Cherry, 2012)

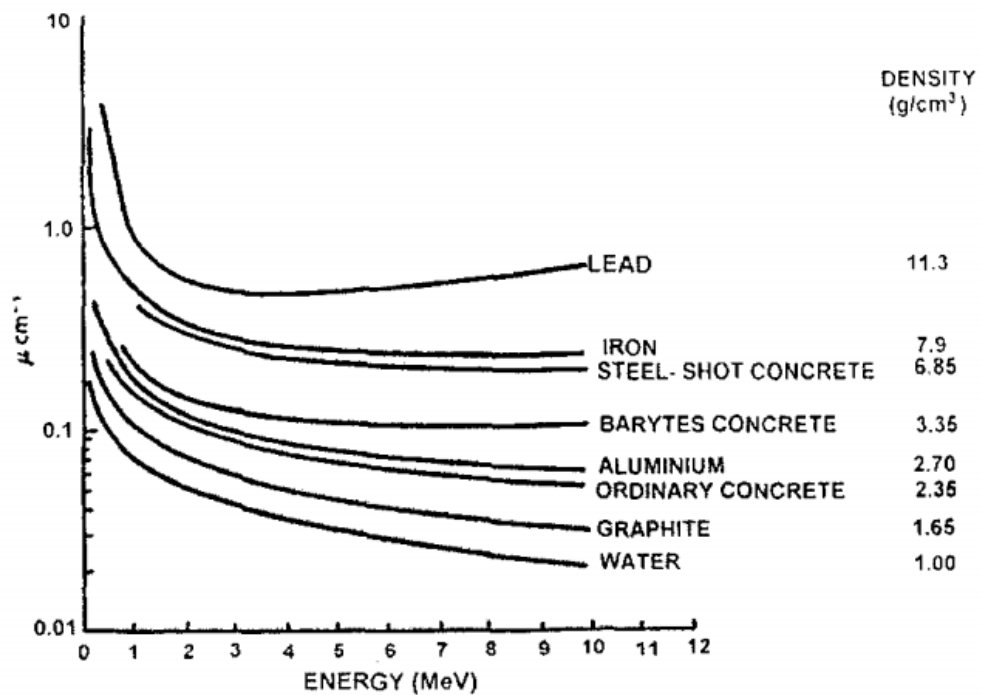
Penurunan intensitas radiasi ($\Delta I/I$) terkait dengan ketebalan Δx dituliskan^[21]:

$$\Delta I/I = -\mu \times \Delta x \dots\dots\dots(2.1)$$

Tanda negatif menandakan apabila ketebalan bahan penyerap bertambah, maka intensitas radiasi juga akan menurun. Nilai μ disebut sebagai koefisien atenuasi linear dari material penyerap radiasi. Dimensi dari koefisien atenuasi linear adalah ketebalan dipangkatkan dengan nilai -1 atau biasa dituliskan cm^{-1} .

II.6 Koefisien Atenuasi Bahan

Nilai koefisien atenuasi (μ) dari setiap material memiliki nilai yang berbeda-beda. Nilai μ ditentukan oleh kerapatan dari bahan yang digunakan. Berikut disajikan dalam Gambar II.7 nilai koefisien atenuasi linear dari setiap bahan pada rentang energi dalam satuan MV dan MeV^[22].



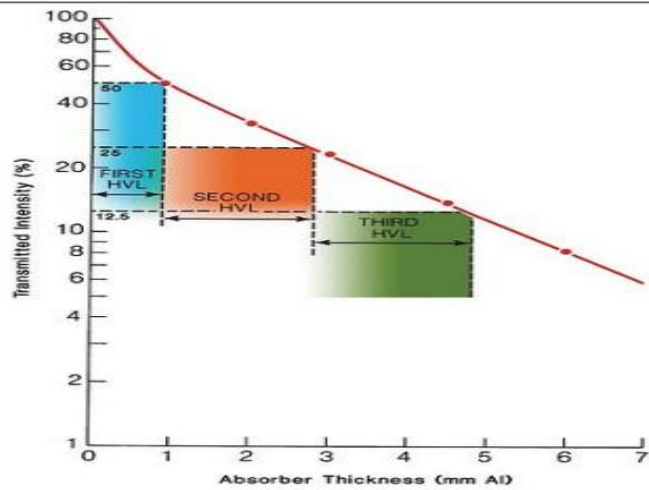
Gambar II.7 Nilai Koefisien Atenuasi Bahan Pada Rentang Energi Dalam Satuan MeV (Zeb, 2010)

II.7 HVL (Half Value Layer)

Half value layer merupakan ketebalan yang dibutuhkan untuk menyerap radiasi agar intensitasnya menjadi setengah (I_x) dari intensitas mula-mula (I_0). Secara umum nilai I_x dapat dituliskan^[23]:

$$I_x = I_0/2 \dots\dots\dots(2.2)$$

Nilai HVL menurun seiring meningkatnya nomor atom.



Gambar II.8 Perbandingan Antara Intensitas Dengan Tebal Material Penyerap (Khan, 2014)

Intensitas radiasi yang diterima oleh detektor ditentukan oleh tebal filter yang dilalui. Semakin tebal suatu filter yang dilalui maka intensitas radiasi yang diterima oleh detektor akan semakin kecil (Gambar II.8).

Dengan mendefinisikan nilai HVL (persamaan 2.2), dapat diperoleh hubungan antara HVL dengan koefisien atenuasi linear dan dapat dituliskan^[23]:

$$I_x = I_0 \exp(-\mu x) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana I_x adalah intensitas yang diperoleh setelah radiasi melewati material dengan tebal x , I_0 adalah intensitas radiasi mula-mula dan μ adalah koefisien atenuasi linear dari material yang digunakan^[7].

Untuk menghindari radiasi langsung yang diterima oleh pasien, maka diperlukan radiasi setengah dari intensitas mula-mula dengan menambahkan filter pada sumber radiasi. Jika intensitas sinar-X yang diterima adalah setengah dari intensitas awal, maka dapat dihitung tebal filter yang dibutuhkan untuk

menghasilkan setengah dari intensitas mula-mula, maka (persamaan 2.3) dapat ditulis menjadi:

$$I_0/2 = I_0 \exp(-\mu x_{1/2}) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana $x_{1/2}$ dapat dituliskan sebagai HVL (*Half Value Layer*).

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} \ln 1/2 &= \ln \exp(-\mu HVL) \\ (-0.693) &= -\mu HVL \\ HVL &= 0.693/\mu \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

Nilai HVL yang diperoleh berguna sebagai pengaman bagi pasien agar tidak mendapat paparan radiasi secara langsung dari sumber radiasi pada pesawat radioterapi Linac.

II.8 Metode Ekstrapolasi

Ekstrapolasi adalah proses memperkirakan nilai suatu variabel melampaui interval pengamatan aslinya berdasarkan hubungannya dengan variabel lainnya^[24]. Misal diberikan dua buah titik, (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) . Polinom yang mengekstrapolasi kedua titik itu adalah persamaan garis lurus yang berbentuk:

$$P(x) = a_0 + a_1x \dots\dots\dots (2.6)$$

Koefisien a_0 dan a_1 dicari dengan proses substitusi dan eliminasi. Dengan mensubstitusikan (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) ke dalam persamaan $p_1(x) = a_0 + a_1x$ diperoleh dua persamaan linear:

$$y_0 = a_0 + a_1x_0 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dari dua persamaan diatas, dengan eliminasi diperoleh:

$$y_0 - y_1 = (a_0 + a_1x_0) - (a_0 + a_1x_1)$$

$$y_0 - y_1 = a_1x_0 - a_1x_1 \Leftrightarrow y_0 - y_1 = a_1(x_0 - x_1)$$

$$\Leftrightarrow a_1 = \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1}$$

Substitusikan nilai a_1 ke dalam persamaan (2.7), diperoleh:

$$y_0 = a_0 + a_1x_0$$

$$\Leftrightarrow y_0 = a_0 + \left(\frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} \right) x_0$$

$$\Leftrightarrow y_0 = a_0 + \frac{x_0y_0 - x_0y_1}{x_0 - x_1}$$

$$\Leftrightarrow y_0 = a_0 + \frac{x_0y_0 - x_0y_1}{x_0 - x_1}$$

$$\Leftrightarrow a_0 = y_0 - \frac{x_0y_0 - x_0y_1}{x_0 - x_1}$$

$$\Leftrightarrow a_0 = \frac{y_0(x_0 - x_1) - x_0y_0 + x_0y_1}{x_0 - x_1}$$

$$\Leftrightarrow a_0 = \frac{x_0y_0 - x_1y_0 - x_0y_0 + x_0y_1}{x_0 - x_1}$$

$$\Leftrightarrow a_0 = \frac{x_0y_1 - x_1y_0}{x_0 - x_1}$$

Dengan melakukan manipulasi aljabar untuk menentukan nilai $p_1(x)$ dapat

dilakukan sebagai berikut:

$$p_1(x) = a_0 + a_1x$$

$$p_1(x) = \frac{x_1y_0 - x_0y_1}{x_1 - x_0} + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} x$$

$$p_1(x) = \frac{x_1y_0 - x_0y_1 + xy_1 - xy_0}{x_1 - x_0}$$

$$p_1(x) = \frac{x_1y_0 - x_0y_1 + xy_1 - xy_0 + (x_0y_0 - x_0y_0)}{x_1 - x_0}$$

$$p_1(x) = \frac{x_1 y_0 - x_0 y_0 - x_0 y_1 + x y_1 - x y_0 + x_0 y_0}{x_1 - x_0}$$

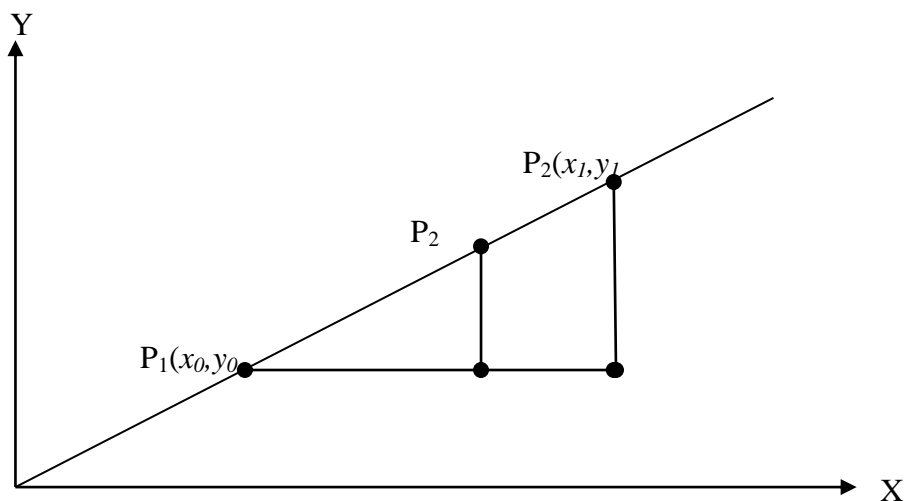
$$p_1(x) = \frac{y_0(x_1 - x_0) + y_1(x - x_0) - y_0(x - x_0)}{x_1 - x_0}$$

$$p_1(x) = \frac{y_0(x_1 - x_0) + (y_1 - y_0)(x - x_0)}{x_1 - x_0}$$

$$p_1(x) = y_0 + \frac{(y_1 - y_0)(x - x_0)}{x_1 - x_0} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dalam menentukan persamaan dari ekstrapolasi linear juga dapat dilakukan melalui cara berikut^[24]:

Menentukan titik-titik antara dari 2 buah titik dengan menggunakan garis lurus.



Gambar II.9 Ekstrapolasi Linier

Persamaan garis lurus yang melalui 2 titik P₁ (x₀,y₀) dan P₂ (x₁,y₁) dapat dituliskan dengan:

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

Sehingga diperoleh persamaan dari ekstrapolasi linear sebagai berikut:

$$y = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) + y_0 \dots\dots\dots (2.11)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini telah dilaksanakan di bagian Instalasi Radioterapi Rumah Sakit Universitas Hasanuddin pada bulan September 2016.

III.2 Alat dan Bahan

1. Pesawat Radioterapi *Linear accelerator*

Pesawat Radioterapi *Linear accelerator* merek Varian model HCX 6540 berfungsi sebagai penghasil sinar-X.

2. Filter

Filter yang digunakan dari bahan aluminium yang berfungsi sebagai material penyerap radiasi.

3. *Solid Water Phantom*

Solid Water Phantom berfungsi untuk menempatkan filter

4. *Rose Chamber*

Rose Chamber merek Iba S/N 1243 yang berfungsi untuk mengukur energi yang berhasil melewati filter.

5. *Dose 1*

Dose 1 merek Iba S/N 19892 yang berfungsi untuk menampilkan muatan listrik yang diterima oleh detektor.

III.3. Prosedur Penelitian

III.3.1 Pengambilan Data

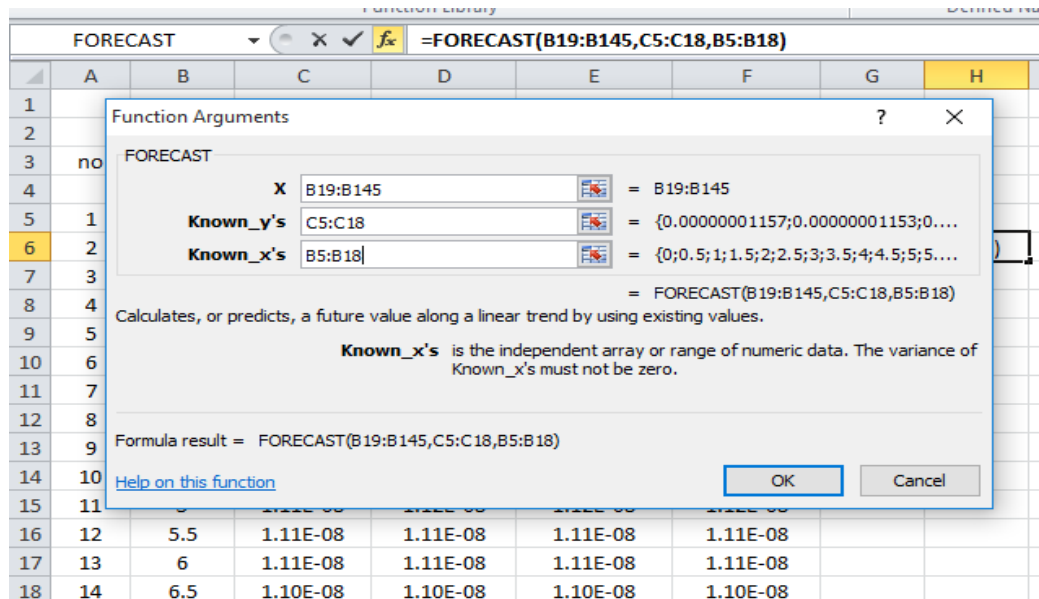
1. Mempersiapkan pesawat radioterapi *Linear accelerator* dalam kondisi siap pakai.
2. Menyiapkan *Solid Water Phantom*, *Dose 1*, *Rose Chamber* dan filter.
3. Mengatur posisi pesawat radioterapi *Linear accelerator* terhadap *Solid Water Phantom* dengan posisi vertikal.
4. Mengatur energi pada pesawat radioterapi *Linear accelerator*.
5. Melakukan penyinaran foton dengan energi 6 MV
 - a. Penyinaran tanpa filter
 - b. Menggunakan filter
 - c. Melakukan pengukuran radiasi dengan variasi ketebalan filter
6. Mencatat nilai yang diperoleh dari setiap penyinaran.
7. Mengulang langkah ke 5 dengan energi 10 MV.

III.3.2 Ekstrapolasi Data

Data hasil pengukuran kemudian diekstrapolasi menggunakan *software* Microsoft Excel 2010. Fungsi yang digunakan pada Microsoft Excel 2010 untuk melakukan ekstrapolasi ada perintah *forecast* . Pada penelitian ini data yang akan diekstrapolasi adalah hasil dari pengukuran langsung berupa data muatan listrik.

Kolom X diisi dengan rentang ketebalan yang akan diprediksi untuk mendapat nilai muatan yang diinginkan. Dalam penelitian ini rentang ketebalan yang ingin ditentukan nilai muatannya mulai dari 7 mm hingga 84.5 dengan peningkatan 0.5 mm tiap ketebalan. Kolom *Known_y's* diisi dengan nilai muatan

yang diperoleh pada saat pengukuran, sedangkan kolom *Known_x's* diisi dengan nilai ketebalan yang digunakan pada saat pengukuran yaitu ketebalan 0 mm, 0.5 mm, 1 mm hingga ketebalan 6.5 mm yang meningkat 0.5 mm tiap ketebalan (Gambar III.1).



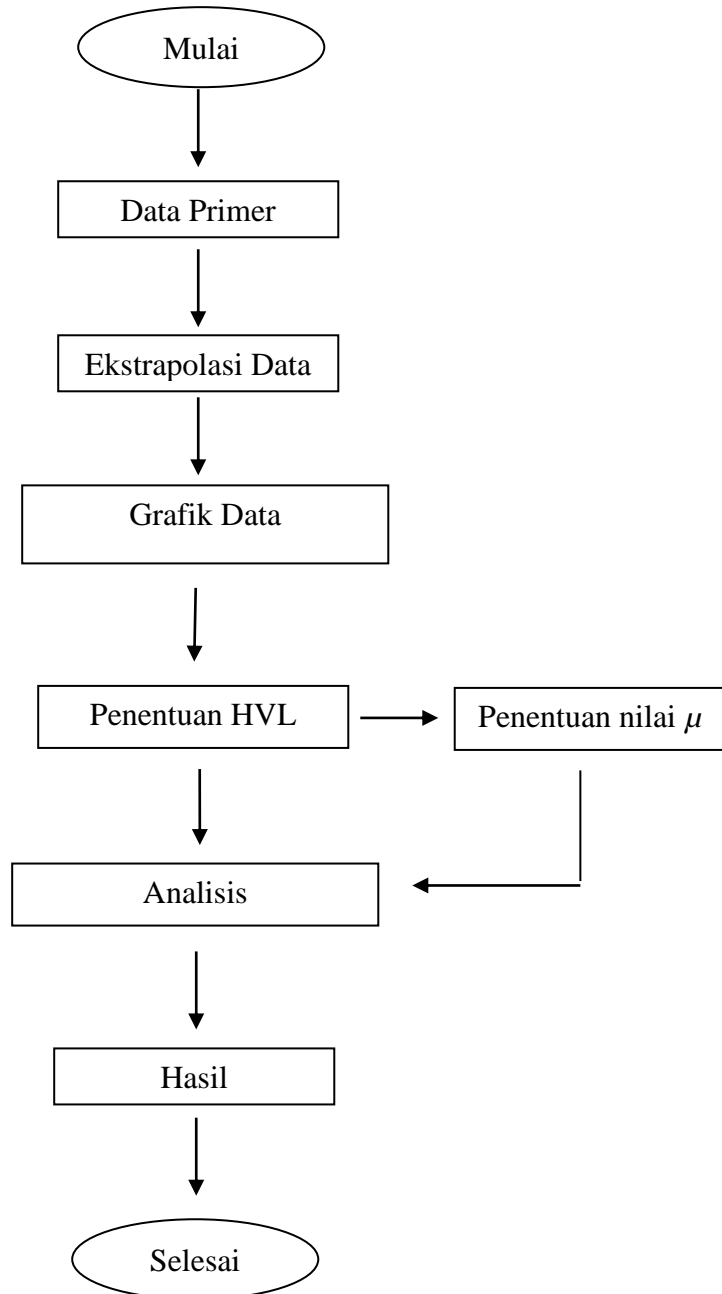
Gambar III.1 Fungsi Statistik *Forecast* di Microsoft Excel 2010

Untuk melakukan Ekstrapolasi Data

III.3.3 Analisis Data

Data hasil penelitian berupa data pengukuran langsung dan data hasil ekstrapolasi melalui Microsoft Excel 2010 terlebih dahulu dikonversi kedalam bentuk energi dengan satuan joule kemudian di plot dalam bentuk grafik untuk menentukan posisi nilai HVL. *Software* yang digunakan untuk membuat grafik pada penelitian ini adalah Microsoft Excel 2010. Nilai HVL yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan nilai koefisien atenuasi linear dari plat aluminium yang digunakan berdasarkan persamaan 2.5.

III.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar III.2 Bagan Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Pengukuran

Pesawat Linac yang digunakan dalam penelitian ini adalah pesawat linac merek Varian model HCX 6540. Jenis pesawat ini digunakan untuk terapi foton dan terapi elektron.

Pengukuran langsung dilakukan dengan SSD 100 dengan lapangan kolimasi 10 cm x 10 cm. Energi yang digunakan pada penelitian ini adalah foton dengan energi 6 MV dan 10 MV. Filter yang digunakan adalah aluminium dengan ketebalan 1 mm sampai 6.5 mm. Setiap ketebalan dilakukan pengukuran sebanyak tiga kali.

Pengambilan data langsung dilakukan dengan metode penambahan tebal filter yaitu 0.5 mm tiap ketebalan sehingga ketebalan yang digunakan adalah 1 mm, 1.5 mm, 2 mm hingga mencapai ketebalan 6.5 mm. Hasil pengukuran diperoleh besaran muatan listrik (Q) dalam satuan Coulomb (C). Nilai muatan listrik yang diperoleh kemudian dikonversi ke dalam energi dengan satuan joule.

Data hasil pengukuran langsung (data primer) yang diperoleh kemudian diekstrapolasi menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 untuk menentukan posisi nilai HVL. Nilai HVL yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan nilai koefisien atenuasi linear secara eksperimen.

Pengukuran langsung yang dilakukan dengan variasi ketebalan filter diperoleh data primer berupa cacahan muatan listrik. Tabel IV.1 merupakan hasil

pengukuran pada energi 6 MV dan tabel IV.2 merupakan hasil pengukuran pada energi 10 MV.

Tabel IV.1 Data Primer Hasil Pengukuran pada Energi 6 MV dengan Variasi Ketebalan Filter

No	x (mm)	Muatan (Q)			Muatan Rata-rata	Energi (Joule)
		I (C)	II (C)	III (C)		
1	0	1.157×10^{-8}	1.159×10^{-8}	1.159×10^{-8}	1.158×10^{-8}	5.20×10^{-3}
2	1	1.149×10^{-8}	1.150×10^{-8}	1.151×10^{-8}	1.150×10^{-8}	5.18×10^{-3}
3	1.5	1.145×10^{-8}	1.146×10^{-8}	1.147×10^{-8}	1.146×10^{-8}	5.16×10^{-3}
4	2	1.141×10^{-8}	1.141×10^{-8}	1.141×10^{-8}	1.141×10^{-8}	5.14×10^{-3}
5	2.5	1.136×10^{-8}	1.137×10^{-8}	1.138×10^{-8}	1.137×10^{-8}	5.12×10^{-3}
6	3	1.132×10^{-8}	1.132×10^{-8}	1.134×10^{-8}	1.132×10^{-8}	5.10×10^{-3}
7	3.5	1.128×10^{-8}	1.128×10^{-8}	1.129×10^{-8}	1.128×10^{-8}	5.08×10^{-3}
8	4	1.123×10^{-8}	1.124×10^{-8}	1.124×10^{-8}	1.123×10^{-8}	5.06×10^{-3}
9	4.5	1.118×10^{-8}	1.120×10^{-8}	1.120×10^{-8}	1.119×10^{-8}	5.04×10^{-3}
10	5	1.114×10^{-8}	1.115×10^{-8}	1.116×10^{-8}	1.115×10^{-8}	5.02×10^{-3}
11	5.5	1.111×10^{-8}	1.110×10^{-8}	1.111×10^{-8}	1.110×10^{-8}	5.01×10^{-3}
12	6	1.106×10^{-8}	1.107×10^{-8}	1.107×10^{-8}	1.106×10^{-8}	4.98×10^{-3}
13	6.5	1.101×10^{-8}	1.102×10^{-8}	1.103×10^{-8}	1.101×10^{-8}	4.97×10^{-3}

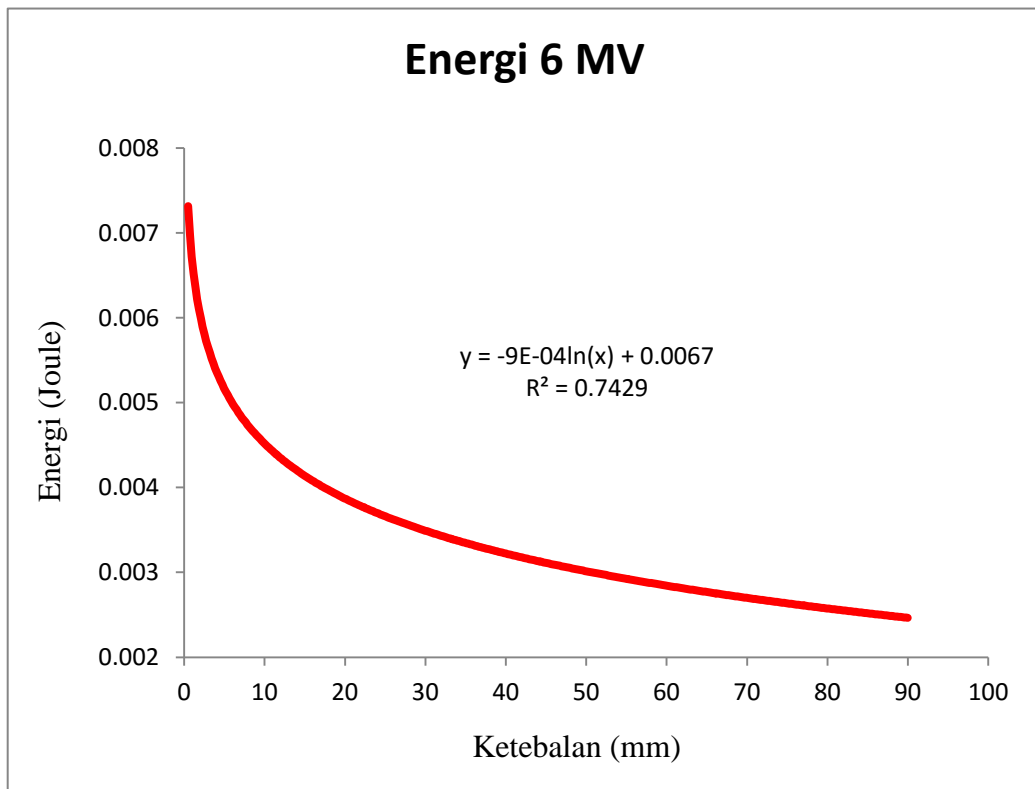
**Tabel IV.2 Data Primer Hasil Pengukuran pada Energi 10 MV dengan
Variasi Ketebalan Filter**

No	x (mm)	Muatan (Q)			Rata-rata	Energi (Joule)
		I (C)	II (C)	III (C)		
1	0	1.278×10^{-8}	1.277×10^{-8}	1.277×10^{-8}	1.277×10^{-8}	5.73×10^{-3}
2	1	1.271×10^{-8}	1.270×10^{-8}	1.270×10^{-8}	1.270×10^{-8}	5.72×10^{-3}
3	1.5	1.267×10^{-8}	1.267×10^{-8}	1.263×10^{-8}	1.265×10^{-8}	5.70×10^{-3}
4	2	1.262×10^{-8}	1.262×10^{-8}	1.262×10^{-8}	1.262×10^{-8}	5.68×10^{-3}
5	2.5	1.259×10^{-8}	1.259×10^{-8}	1.259×10^{-8}	1.259×10^{-8}	5.67×10^{-3}
6	3	1.255×10^{-8}	1.255×10^{-8}	1.255×10^{-8}	1.255×10^{-8}	5.65×10^{-3}
7	3.5	1.251×10^{-8}	1.250×10^{-8}	1.251×10^{-8}	1.250×10^{-8}	5.63×10^{-3}
8	4	1.247×10^{-8}	1.247×10^{-8}	1.247×10^{-8}	1.247×10^{-8}	5.61×10^{-3}
9	4.5	1.244×10^{-8}	1.243×10^{-8}	1.243×10^{-8}	1.243×10^{-8}	5.60×10^{-3}
10	5	1.239×10^{-8}	1.239×10^{-8}	1.239×10^{-8}	1.239×10^{-8}	5.58×10^{-3}
11	5.5	1.236×10^{-8}	1.235×10^{-8}	1.235×10^{-8}	1.235×10^{-8}	5.56×10^{-3}
12	6	1.232×10^{-8}	1.233×10^{-8}	1.232×10^{-8}	1.232×10^{-8}	5.55×10^{-3}
13	6.5	1.228×10^{-8}	1.228×10^{-8}	1.227×10^{-8}	1.227×10^{-8}	5.53×10^{-3}

IV.2 Pembahasan

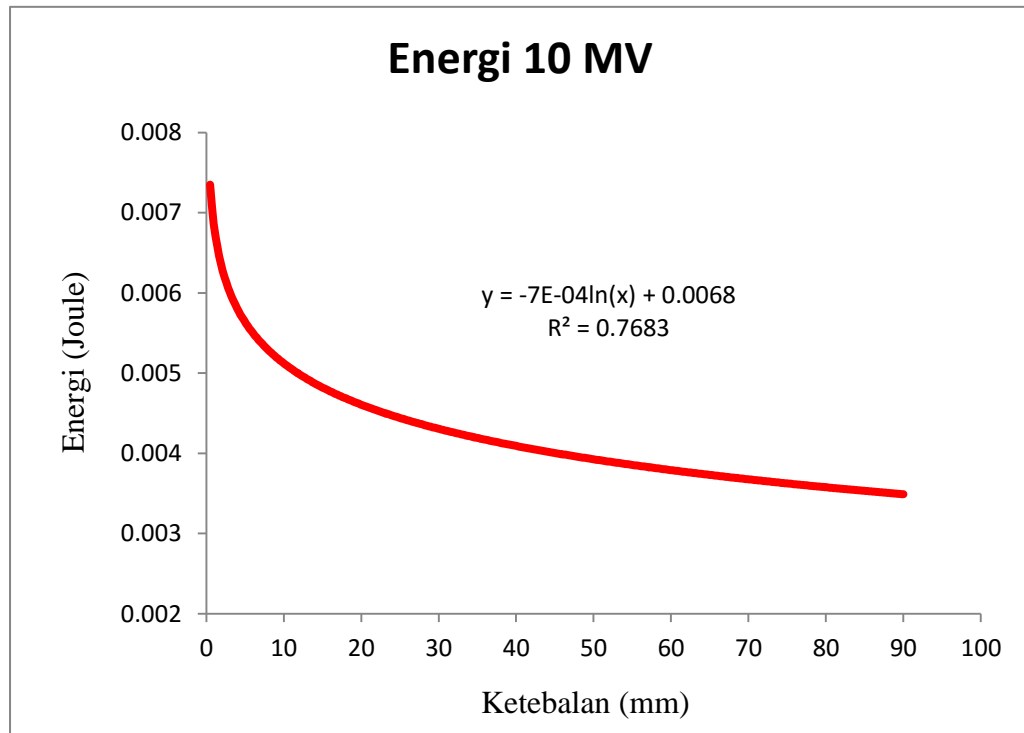
IV.2.1 Data Hasil Ekstrapolasi

Data primer yang diperoleh dari pengukuran langsung kemudian diekstrapolasi menggunakan Microsot Excel 2010. Data ekstrapolasi pada energi 6 MV diperoleh nilai muatan listrik yang kemudian dikonversi ke dalam bentuk energi dalam satuan Joule. Energi yang diperoleh menurun seiring dengan meningkatnya ketebalan yang diberikan (lampiran 1). Data ekstrapolasi pada energi 10 MV memberikan nilai yang sama yaitu menurun seiring bertambahnya filter yang diberikan (lampiran 2). Berikut disajikan grafik cacahan energi terhadap ketebalan filter pada energi 6 MV.



Gambar IV.1 Grafik Cacahan Energi Terhadap Ketebalan Filter pada Energi 6 MV

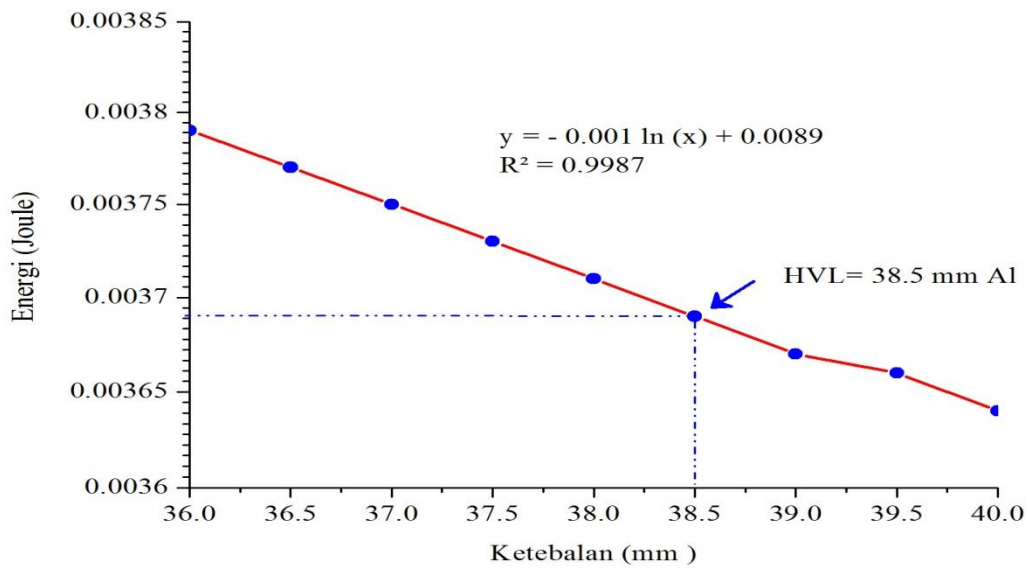
Berikut disajikan grafik cacahan energi terhadap ketebalan filter pada energi 10 MV.



Gambar IV.2 Grafik Cacahan Energi Terhadap Ketebalan Filter pada Energi 10 MV

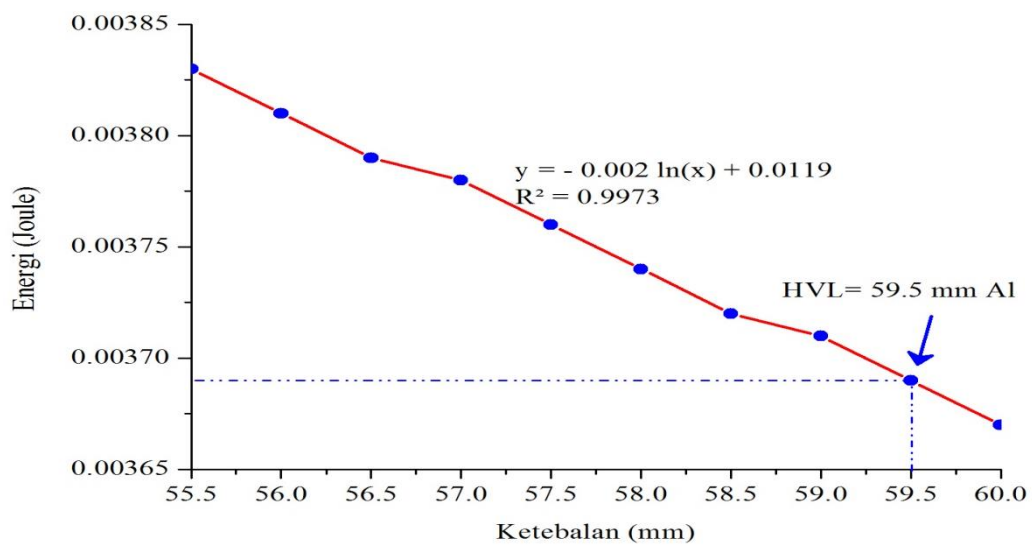
IV.2.2 Nilai HVL

Setelah ekstrapolasi selesai dilakukan, kemudian diambil nilai dari hasil pengukuran yang memenuhi persamaan 2.2. Pada energi 6 MV nilai yang memenuhi persamaan 2.2 adalah 3.69×10^{-3} Joule pada ketebalan 38.5 mm (3.85 cm), sehingga nilai HVL pada energi 6 MV yaitu 3.85 cm. Berikut disajikan grafik yang menunjukkan nilai HVL pada energi 6 MV berdasarkan data hasil ekstrapolasi (Gambar IV.3)



Gambar IV.3 Grafik Yang Menunjukkan Nilai HVL Pada Energi 6 MV

Pada energi 10 MV nilai yang memenuhi persamaan 2.2 yaitu sebesar 3.69×10^{-3} Joule yang diperoleh pada ketebalan 59.5 mm (5.95 cm), sehingga nilai HVL pada energi 10 MV adalah 5.95 cm. Berikut disajikan grafik yang menunjukkan nilai HVL pada energi 10 MV berdasarkan data hasil ekstrapolasi (Gambar IV.4).



Gambar IV.4 Grafik Yang Menunjukkan Nilai HVL Pada Energi 10 MV

Penelitian mengenai HVL yang dilakukan oleh Meli (1985)^[6] dapat dibandingkan dengan penelitian ini karena menggunakan bahan yang sama yaitu plat aluminium dan energi sinar-X yang sama. Penelitian Meli (1985) dan penelitian ini hanya dibedakan melalui metode. Meli (1985) menggunakan metode pengukuran langsung, sedangkan penelitian ini dilakukan dengan metode ekstrapolasi.

Pada energi 6 MV, Meli (1985) memperoleh nilai 6.1 cm sedangkan dalam penelitian ini diperoleh nilai HVL 3.85 cm. Pada energi 10 MV, Meli (1985) memperoleh nilai HVL yaitu 7.5 cm, sedangkan dalam penelitian ini diperoleh nilai HVL 5.95 cm.

Dari data yang disajikan melalui penelitian Meli (1985) dan data dari penelitian ini, nilai HVL yang diperoleh memiliki perbedaan cukup jauh untuk masing-masing energi. Hal ini bisa dipengaruhi oleh kondisi alat yang digunakan mengingat perbedaan waktu penelitian yang cukup jauh yakni penelitian Meli pada tahun 1985 sedangkan penelitian ini pada tahun 2016.

IV.2.3 Koefisien Atenuasi Linear (μ) Bahan

Nilai HVL yang telah diperoleh kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan 2.5 untuk memperoleh nilai koefisien atenuasi linear (μ) secara eksperimen. Dengan menggunakan persamaan 2.5 yaitu $HVL = 0.693 / \mu$, sehingga diperoleh

$$\mu = 0.693 / HVL$$

Untuk energi 6 MV, dengan nilai HVL 3.85 cm diperoleh:

$$\mu = 0.693 / 3.85 \text{ cm}$$

$$= 0.18 \text{ cm}^{-1}$$

Pada energi 6 MV, nilai koefisien atenuasi linear (μ) yang diperoleh secara eksperimen hampir sama dengan nilai koefisien atenuasi secara teori. Secara eksperimen, nilai koefisien atenuasi linear yang diperoleh adalah 0.18 cm^{-1} sedangkan nilai koefisien atenuasi linear secara teori yaitu 0.1 cm^{-1} .

Untuk energi 10 MV, dengan nilai HVL 5.95 cm diperoleh:

$$\mu = 0.693 / 5.95 \text{ cm}$$

$$= 0.107 \text{ cm}^{-1}$$

Pada energi 10 MV, nilai koefisien atenuasi linear (μ) yang diperoleh secara eksperimen juga mendekati nilai koefisien atenuasi secara teori. Secara eksperimen, nilai koefisien atenuasi linear yang diperoleh adalah 0.107 cm^{-1} sedangkan secara teori diberikan nilai 0.9 cm^{-1} . Ini membuktikan bahwa penentuan nilai HVL dengan metode ekstrapolasi cukup akurat dalam menentukan nilai HVL dari sebuah bahan yang dapat dibuktikan melalui nilai μ secara eksperimen dan teori hampir sama.

BAB V

PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh setelah melakukan penelitian ini adalah:

1. Nilai HVL pada energi 6 MV adalah 3.85 cm dengan energi yang diperoleh sebesar 3.69×10^{-3} Joule dan pada energi 10 MV adalah 5.95 cm dengan energi yang diperoleh sebesar 3.69×10^{-3} Joule.
2. Nilai koefisien atenuasi linear pada energi 6 MV diperoleh 0.18 cm^{-1} , dan pada energi 10 MV diperoleh nilai sebesar 0.107 cm^{-1} .
3. Nilai HVL hasil pengukuran langsung dengan nilai HVL hasil ekstrapolasi yang diperoleh memiliki perbedaan cukup jauh untuk masing-masing energi.

V.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengembangan penelitian tentang HVL dengan menggunakan energi lain yaitu elektron dan sumber pesawat radioterapi lainnya seperti pesawat radioterapi Cobalt.
2. Perlu dilakukan pengembangan penelitian tentang HVL secara ekstrapolasi dengan menggunakan jenis filter lainnya seperti plat tembaga (Cu) atau plat besi (Fe).
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan material yang lain seperti timah dan timbal kemudian membandingkan hasilnya dengan metode pengukuran langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Yücel, E. Emirhan, A. Bayrak, C.S. Ozben dan E. BarlasYücel. 2015. *Comparison Of Simulated And Measured Spectra From An X-Ray Tube For The Energies Between 20 And 35 Kev. Jurnal Nuclear Instrument and methods in physics research.*A 799, hal 50-53.
- [2] M. Lacerda, T. Silva dan Arno H. Oliveira. 2007. *The Methodology For Evaluating Half-Value Layer And Its Influence On The Diagnostic Radiology. Jurnal Radiol Bras.* 40(5), hal 331-336.
- [3] E. Ariga, S. Ito, S. Deji, T. Saze dan K. Nishizawa. 2012. *Determination Of Half Value Layers Of X-Ray Equipment Using Computed Radiography Imaging Plates. Jurnal Physica Medica.* 28 hal 71-75.
- [4] L. D Godfrey, D. J Adeyemo, U. Sadiq dan R. Onoja. 2015. *Evaluation of Half Value Layer (HVL) and Homogeneity Factor (HF) of Some Hospitals in Zaria Enviros Kaduna State Nigeria. Jurnal Archives of Applied Science Research,* 7(5) hal 1-3.
- [5] S. Li, K. Kang, Y. Wang, J. Li, J. Song, dan Y. Li. 2011. *Using Cerenkov Detector in HVL Measurements for Industrial Electron Linacs.*Jurnal *Radiation Measurements,* 46 hal 726-729.
- [6] J. A. Meli dan R. Nath. 1985. *Choice of Material For HVL Measurements in Megavoltage Xray Beams. Journal Medical Physics* 12, 108 (1985).
- [7] M. Khan. 2014. *The Physics of Radiation Therapy 5thEdition. Lippincott Williams & Wilkins.* Philadelphia, USA
- [8] E.B. Podgorsak. 2005. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Students. IAEA,* Austria.
- [9] A. T. B. Neto dan L. O. Faria. 2014. *Construction and Calibration of a Multipurpose Instrument to Simultaneously Measure Dose, Voltage and*

Half-Value Layer in X-ray Emission Equipment. Jurnal Radiation Measurements.

- [10] M. Maarouf, H. Treuer, M. Kocher, J. Voges, A. Gierich dan V. Sturm. 2005. *Radiation Exposure of Extracranial Organ at Risk during Stereotactic Linac Radiosurgery. Jurnal Strahlentherapie und Onkologie*, 181 hal 463-467.
- [11] Darmawati dan Suharni. 2012. *Implementasi Linear Accelerator dalam Penanganan Kasus Kanker. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, vol. 14 hal 36-47.
- [12] C. Glide-Hurst dan M. Bellon. 2013. *Commissioning of the Varian True Beam Linear Accelerator: A Multi-Institutional Study. Jurnal Medical Physics*, vol. 40, no.3.
- [13] M. Khan. 2010. *The Physics of Radiation Therapy 4th Edition. Lippincott Williams & Wilkins*, Minnesota.
- [14] A. Deresch, C. Bellon dan G.-R. Jaenisch. 2015. *A General Spectrum Model for X-ray Generators. Jurnal NDT and E International* S0963-8695(15)00138-3.
- [15] M. Zhang, Q. Zhang, H. Gan, S. Li dan S. Zhou. 2016. *Setup Uncertainties in Linear Accelerator Based Stereotactic Radiosurgery and a Derivation of the Corresponding Setup Margin for Treatment Planning. Jurnal Physica Medica.*
- [16] P. Andreo dan D. Burns. 2004. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. IAEA, Vienna, Austria.*
- [17] K. Alikaniotis, O. Borla, V. Monti, G. Vivaldo, A. Zanini, dan G. Giannini. 2015. *Radhioterapy Dose Enhancement Using BNCT in Conventional Linacs High-Energy Treatment: simulation and Experiment. Jurnal Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, 21 hal 117-122.

- [18] Suharni, F. I. Diah, dan P. Anggarita. 2010. *Tinjauan Teknologi Akselerator Linear (Linac) Elekta Precise di RSUP DR. Sardjito. Prosiding PPI – PDIPTN 2010*, hal 166-175.
- [19] C. M. Thompson, S. J Weston, V. C. Cosgrove dan D. I. Thwaites. 2014. *A Dosimetric Characterization of a Novel Linear Accelerator Collimator. Jurnal Medical Physics*, 41(3) hal 031713-1 – 031713-11.
- [20] M. F. Chan dan Y. Song. 2008. *A Novel Radiotherapy Technique. Jurnal IGI Global*, hal 1016-1023.
- [21] S. R. Cherry, J. A. Sorensen dan M. E. Phelps. 2012. *Physics in Nuclear Medicine 4th Edition. Elsevier. Philadelphia, USA.*
- [22] J. Zeb, W. Arshed, A. Rashid dan P. Akhter. 2010. *Gamma Shielding by Aluminum (Al-Shielder Manual). Health Physics Division Directorate of Systems & Services Pakistan Institute of Nuclear Science & Technology P. O. Nilore, Islamabad, Pakistan.*
- [23] W. B. Nurdin. 2015. *Fisika Kedokteran Nuklir, Pusat Kajian dan Peningkatan Aktivitas Instruksional LKPP Universitas Hasanuddin, Makassar.*
- [24] Anonim. 2011. *Apa itu dan Bagaimana Rumus Ekstrapolasi.*

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

DATA CACAHAN HASIL EKSTRAPOLASI PADA ENERGI 6 MV

No	x (mm)	Muatan (C)			Muatan rata- rata	Energi (Joule)
		I	II	III		
1	0	1.16E-08	1.16E-08	1.16E-08	1.16E-08	5.20E-03
2	0.5	1.15E-08	1.16E-08	1.16E-08	1.15E-08	5.18E-03
3	1	1.15E-08	1.15E-08	1.15E-08	1.15E-08	5.16E-03
4	1.5	1.15E-08	1.15E-08	1.15E-08	1.15E-08	5.14E-03
5	2	1.14E-08	1.14E-08	1.14E-08	1.14E-08	5.12E-03
6	2.5	1.14E-08	1.14E-08	1.14E-08	1.14E-08	5.10E-03
7	3	1.13E-08	1.13E-08	1.13E-08	1.13E-08	5.08E-03
8	3.5	1.13E-08	1.13E-08	1.13E-08	1.13E-08	5.06E-03
9	4	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	5.04E-03
10	4.5	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	5.02E-03
11	5	1.11E-08	1.12E-08	1.12E-08	1.12E-08	5.01E-03
12	5.5	1.11E-08	1.11E-08	1.11E-08	1.11E-08	4.98E-03
13	6	1.11E-08	1.11E-08	1.11E-08	1.11E-08	4.97E-03
14	6.5	1.10E-08	1.10E-08	1.10E-08	1.10E-08	4.94E-03
15	7	1.09723E-08	1.09756E-08	1.09824E-08	1.09768E-08	4.92E-03
16	7.5	1.09292E-08	1.09319E-08	1.09374E-08	1.09328E-08	4.91E-03
17	8	1.08848E-08	1.0889E-08	1.08943E-08	1.08894E-08	4.88 E-03
18	8.5	1.08409E-08	1.08454E-08	1.08505E-08	1.08456E-08	4.87 E-03
19	9	1.07971E-08	1.08024E-08	1.08076E-08	1.08024E-08	4.85 E-03
20	9.5	1.07537E-08	1.07587E-08	1.07622E-08	1.07582E-08	4.83 E-03
21	10	1.0711E-08	1.07154E-08	1.07185E-08	1.0715E-08	4.81 E-03
22	10.5	1.06672E-08	1.06711E-08	1.06757E-08	1.06713E-08	4.79 E-03
23	11	1.06242E-08	1.06271E-08	1.06322E-08	1.06278E-08	4.77 E-03
24	11.5	1.05818E-08	1.05835E-08	1.05879E-08	1.05844E-08	4.75 E-03

Data Primer

25	12	1.05384E-08	1.05407E-08	1.05438E-08	1.0541E-08	4.73 E-03
26	12.5	1.04938E-08	1.04972E-08	1.05003E-08	1.04971E-08	4.71 E-03
27	13	1.04496E-08	1.04525E-08	1.04559E-08	1.04527E-08	4.69 E-03
28	13.5	1.04076E-08	1.04096E-08	1.04119E-08	1.04097E-08	4.67 E-03
29	14	1.03643E-08	1.03661E-08	1.03686E-08	1.03663E-08	4.65 E-03
30	14.5	1.03202E-08	1.03224E-08	1.03248E-08	1.03225E-08	4.63 E-03
31	15	1.02771E-08	1.02787E-08	1.02809E-08	1.02789E-08	4.61 E-03
32	15.5	1.02393E-08	1.02351E-08	1.02371E-08	1.02371E-08	4.59 E-03
33	16	1.01917E-08	1.01914E-08	1.01932E-08	1.01921E-08	4.57E-03
34	16.5	1.01458E-08	1.01478E-08	1.01495E-08	1.01477E-08	4.55E-03
35	17	1.0101E-08	1.01042E-08	1.01056E-08	1.01036E-08	4.53E-03
36	17.5	1.00579E-08	1.00607E-08	1.00616E-08	1.00601E-08	4.52E-03
37	18	1.00172E-08	1.00171E-08	1.00178E-08	1.00174E-08	4.49E-03
38	18.5	9.98053E-09	9.97344E-09	9.974E-09	9.97599E-09	4.48E-03
39	19	9.9318E-09	9.92977E-09	9.93019E-09	9.93059E-09	4.46E-03
40	19.5	9.88519E-09	9.88619E-09	9.88636E-09	9.88591E-09	4.44E-03
41	20	9.83992E-09	9.84265E-09	9.84258E-09	9.84172E-09	4.42E-03
42	20.5	9.79699E-09	9.79895E-09	9.79873E-09	9.79822E-09	4.40E-03
43	21	9.75707E-09	9.75534E-09	9.75484E-09	9.75575E-09	4.38E-03
44	21.5	9.71175E-09	9.71175E-09	9.711E-09	9.7115E-09	4.36E-03
45	22	9.67008E-09	9.66815E-09	9.66717E-09	9.66847E-09	4.34E-03
46	22.5	9.63133E-09	9.62455E-09	9.62334E-09	9.62641E-09	4.32E-03
47	23	9.58751E-09	9.58095E-09	9.5795E-09	9.58265E-09	4.30E-03
48	23.5	9.53825E-09	9.53733E-09	9.53566E-09	9.53708E-09	4.28E-03
49	24	9.49089E-09	9.49371E-09	9.49184E-09	9.49215E-09	4.26E-03
50	24.5	9.45416E-09	9.45009E-09	9.44802E-09	9.45076E-09	4.24E-03
51	25	9.41167E-09	9.40648E-09	9.40418E-09	9.40744E-09	4.22E-03
52	25.5	9.36472E-09	9.36288E-09	9.36033E-09	9.36264E-09	4.20E-03
53	26	9.3225E-09	9.31928E-09	9.31649E-09	9.31942E-09	4.18E-03
54	26.5	9.27991E-09	9.27566E-09	9.27266E-09	9.27608E-09	4.16E-03

55	27	9.23689E-09	9.23205E-09	9.22882E-09	9.23259E-09	4.14E-03
56	27.5	9.19858E-09	9.18845E-09	9.18499E-09	9.19067E-09	4.13E-03
57	28	9.15519E-09	9.14484E-09	9.14116E-09	9.14706E-09	4.11E-03
58	28.5	9.10921E-09	9.10122E-09	9.09733E-09	9.10258E-09	4.09E-03
59	29	9.06253E-09	9.05761E-09	9.05349E-09	9.05788E-09	4.07E-03
60	29.5	9.01608E-09	9.014E-09	9.00965E-09	9.01324E-09	4.05E-03
61	30	8.9728E-09	8.97039E-09	8.96582E-09	8.96967E-09	4.03E-03
62	30.5	8.93669E-09	8.92678E-09	8.92198E-09	8.92848E-09	4.01E-03
63	31	8.89469E-09	8.88317E-09	8.87814E-09	8.88534E-09	3.99E-03
64	31.5	8.84844E-09	8.83956E-09	8.83431E-09	8.84077E-09	3.97E-03
65	32	8.79983E-09	8.79595E-09	8.79047E-09	8.79542E-09	3.95E-03
66	32.5	8.75326E-09	8.75234E-09	8.74664E-09	8.75075E-09	3.93E-03
67	33	8.71049E-09	8.70873E-09	8.70281E-09	8.70734E-09	3.91E-03
68	33.5	8.66518E-09	8.66512E-09	8.65897E-09	8.66309E-09	3.89E-03
69	34	8.62192E-09	8.62151E-09	8.61514E-09	8.61952E-09	3.87E-03
70	34.5	8.58812E-09	8.5779E-09	8.5713E-09	8.57911E-09	3.85E-03
71	35	8.5501E-09	8.53429E-09	8.52746E-09	8.53729E-09	3.83E-03
72	35.5	8.50379E-09	8.49068E-09	8.48363E-09	8.4927E-09	3.81E-03
73	36	8.45236E-09	8.44707E-09	8.43979E-09	8.44641E-09	3.79E-03
74	36.5	8.40789E-09	8.40346E-09	8.39596E-09	8.40244E-09	3.77E-03
75	37	8.3663E-09	8.35985E-09	8.35212E-09	8.35943E-09	3.75E-03
76	37.5	8.32734E-09	8.31624E-09	8.30829E-09	8.31729E-09	3.73E-03
77	38	8.28562E-09	8.27263E-09	8.26445E-09	8.27423E-09	3.71E-03
78	38.5	8.24189E-09	8.22902E-09	8.22062E-09	8.23051E-09	3.69E-03
79	39	8.19646E-09	8.18541E-09	8.17678E-09	8.18622E-09	3.67E-03
80	39.5	8.15566E-09	8.1418E-09	8.13295E-09	8.14347E-09	3.66E-03
81	40	8.11689E-09	8.09819E-09	8.08911E-09	8.1014E-09	3.64E-03
82	40.5	8.07311E-09	8.05458E-09	8.04528E-09	8.05766E-09	3.62E-03
83	41	8.02719E-09	8.01097E-09	8.00144E-09	8.0132E-09	3.60E-03
84	41.5	7.98273E-09	7.96736E-09	7.95761E-09	7.96923E-09	3.58E-03

85	42	7.93901E-09	7.92375E-09	7.91377E-09	7.92551E-09	3.56E-03
86	42.5	7.89766E-09	7.88014E-09	7.86994E-09	7.88258E-09	3.54E-03
87	43	7.8531E-09	7.83654E-09	7.8261E-09	7.83858E-09	3.52E-03
88	43.5	7.81057E-09	7.79293E-09	7.78227E-09	7.79525E-09	3.50E-03
89	44	7.76372E-09	7.74932E-09	7.73843E-09	7.75049E-09	3.48E-03
90	44.5	7.71113E-09	7.70571E-09	7.6946E-09	7.70381E-09	3.46E-03
91	45	7.66076E-09	7.6621E-09	7.65076E-09	7.65787E-09	3.44E-03
92	45.5	7.60994E-09	7.61849E-09	7.60693E-09	7.61178E-09	3.42E-03
93	46	7.56055E-09	7.57488E-09	7.56309E-09	7.56617E-09	3.40E-03
94	46.5	7.52596E-09	7.53127E-09	7.51926E-09	7.52549E-09	3.38E-03
95	47	7.49684E-09	7.48766E-09	7.47542E-09	7.48664E-09	3.36E-03
96	47.5	7.46222E-09	7.44405E-09	7.43159E-09	7.44595E-09	3.34E-03
97	48	7.41668E-09	7.40044E-09	7.38775E-09	7.40162E-09	3.3E-03
98	48.5	7.36763E-09	7.35683E-09	7.34392E-09	7.35612E-09	3.30E-03
99	49	7.32047E-09	7.31322E-09	7.30008E-09	7.31126E-09	3.28E-03
100	49.5	7.28416E-09	7.26961E-09	7.25625E-09	7.27E-09	3.26E-03
101	50	7.25097E-09	7.226E-09	7.21241E-09	7.22979E-09	3.25E-03
102	50.5	7.21501E-09	7.18239E-09	7.16857E-09	7.18866E-09	3.23E-03
103	51	7.17213E-09	7.13878E-09	7.12474E-09	7.14522E-09	3.21E-03
104	51.5	7.12818E-09	7.09517E-09	7.0809E-09	7.10142E-09	3.19E-03
105	52	7.08783E-09	7.05156E-09	7.03707E-09	7.05882E-09	3.17E-03
106	52.5	7.04347E-09	7.00795E-09	6.99323E-09	7.01488E-09	3.15E-03
107	53	6.99478E-09	6.96434E-09	6.9494E-09	6.96951E-09	3.13E-03
108	53.5	6.95233E-09	6.92073E-09	6.90556E-09	6.92621E-09	3.11E-03
109	54	6.91432E-09	6.87712E-09	6.86173E-09	6.88439E-09	3.09E-03
110	54.5	6.87597E-09	6.83351E-09	6.81789E-09	6.84246E-09	3.07E-03
111	55	6.82885E-09	6.7899E-09	6.77406E-09	6.7976E-09	3.05E-03
112	55.5	6.78043E-09	6.74629E-09	6.73022E-09	6.75231E-09	3.03E-03
113	56	6.72906E-09	6.70268E-09	6.68639E-09	6.70604E-09	3.01E-03
114	56.5	6.6725E-09	6.65907E-09	6.64255E-09	6.65804E-09	2.99E-03

115	57	6.61209E-09	6.61546E-09	6.59872E-09	6.60876E-09	2.97E-03
116	57.5	6.54669E-09	6.57185E-09	6.55488E-09	6.55781E-09	2.94E-03
117	58	6.47702E-09	6.52824E-09	6.51105E-09	6.50543E-09	2.92E-03
118	58.5	6.42187E-09	6.48463E-09	6.46721E-09	6.4579E-09	2.90E-03
119	59	6.38748E-09	6.44102E-09	6.42338E-09	6.41729E-09	2.88E-03
120	59.5	6.36268E-09	6.39741E-09	6.37954E-09	6.37988E-09	2.86E-03
121	60	6.33395E-09	6.3538E-09	6.33571E-09	6.34115E-09	2.85E-03
122	60.5	6.29929E-09	6.31019E-09	6.29187E-09	6.30045E-09	2.83E-03
123	61	6.2618E-09	6.26658E-09	6.24804E-09	6.2588E-09	2.81E-03
124	61.5	6.23436E-09	6.22297E-09	6.2042E-09	6.22051E-09	2.79E-03
125	62	6.21627E-09	6.17936E-09	6.16037E-09	6.18533E-09	2.78E-03
126	62.5	6.20527E-09	6.13575E-09	6.11653E-09	6.15252E-09	2.76E-03
127	63	6.18992E-09	6.09214E-09	6.0727E-09	6.11825E-09	2.75E-03
128	63.5	6.16332E-09	6.04853E-09	6.02886E-09	6.08024E-09	2.73E-03
129	64	6.12978E-09	6.00492E-09	5.98503E-09	6.03991E-09	2.71E-03
130	64.5	6.08376E-09	5.96131E-09	5.94119E-09	5.99542E-09	2.69E-03
131	65	6.02164E-09	5.9177E-09	5.89735E-09	5.94557E-09	2.67E-03
132	65.5	5.96304E-09	5.87409E-09	5.85352E-09	5.89688E-09	2.65E-03
133	66	5.9183E-09	5.83048E-09	5.80968E-09	5.85282E-09	2.63E-03
134	66.5	5.88317E-09	5.78687E-09	5.76585E-09	5.81196E-09	2.61E-03
135	67	5.83967E-09	5.74326E-09	5.72201E-09	5.76831E-09	2.59E-03
136	67.5	5.7835E-09	5.69965E-09	5.67818E-09	5.72044E-09	2.57E-03
137	68	5.71357E-09	5.65604E-09	5.63434E-09	5.66799E-09	2.54E-03
138	68.5	5.63569E-09	5.61243E-09	5.59051E-09	5.61288E-09	2.52E-03
139	69	5.55185E-09	5.56882E-09	5.54667E-09	5.55578E-09	2.49E-03
140	69.5	5.45841E-09	5.52521E-09	5.50284E-09	5.49549E-09	2.47E-03
141	70	5.34883E-09	5.4816E-09	5.459E-09	5.42981E-09	2.44E-03

LAMPIRAN 2

DATA CACAHAN HASIL EKSTRAPOLASI PADA ENERGI 10 MV

no	x (mm)	Muatan (C)			Muatan rata- rata	Energi (Joule)
		I	II	III		
1	0	1.28E-08	1.28E-08	1.28E-08	1.28E-08	5.73E-03
2	0.5	1.28E-08	1.27E-08	1.27E-08	1.27E-08	5.72E-03
3	1	1.27E-08	1.27E-08	1.27E-08	1.27E-08	5.70E-03
4	1.5	1.27E-08	1.27E-08	1.26E-08	1.27E-08	5.68E-03
5	2	1.26E-08	1.26E-08	1.26E-08	1.262E-08	5.67E-03
6	2.5	1.26E-08	1.26E-08	1.26E-08	1.259E-08	5.65E-03
7	3	1.26E-08	1.26E-08	1.26E-08	1.255E-08	5.63E-03
8	3.5	1.25E-08	1.25E-08	1.25E-08	1.25E-08	5.61E-03
9	4	1.25E-08	1.25E-08	1.25E-08	1.247E-08	5.60E-03
10	4.5	1.24E-08	1.24E-08	1.24E-08	1.24E-08	5.58E-03
11	5	1.24E-08	1.24E-08	1.24E-08	1.239E-08	5.56E-03
12	5.5	1.24E-08	1.24E-08	1.24E-08	1.24E-08	5.55E-03
13	6	1.23E-08	1.23E-08	1.23E-08	1.23E-08	5.53E-03
14	6.5	1.23E-08	1.23E-08	1.23E-08	1.23E-08	5.51E-03
15	7	1.22407E-08	1.22419E-08	1.22391E-08	1.22E-08	5.49E-03
16	7.5	1.22013E-08	1.22027E-08	1.22008E-08	1.22E-08	5.48E-03
17	8	1.21632E-08	1.21645E-08	1.21639E-08	1.22E-08	5.46E-03
18	8.5	1.21252E-08	1.21261E-08	1.21271E-08	1.21E-08	5.44E-03
19	9	1.20874E-08	1.20891E-08	1.20851E-08	1.21E-08	5.43E-03
20	9.5	1.2048E-08	1.20507E-08	1.2046E-08	1.20E-08	5.41E-03
21	10	1.20096E-08	1.20135E-08	1.2008E-08	1.20E-08	5.39E-03
22	10.5	1.1971E-08	1.19764E-08	1.19702E-08	1.20E-08	5.37E-03
23	11	1.19323E-08	1.19376E-08	1.19323E-08	1.19E-08	5.36E-03
24	11.5	1.18931E-08	1.18997E-08	1.18944E-08	1.19E-08	5.34E-03
25	12	1.18553E-08	1.18615E-08	1.18563E-08	1.19E-08	5.32E-03

Data Primer

26	12.5	1.18158E-08	1.18229E-08	1.1818E-08	1.18E-08	5.31E-03
27	13	1.17775E-08	1.17836E-08	1.17793E-08	1.18E-08	5.29E-03
28	13.5	1.17391E-08	1.17469E-08	1.17418E-08	1.17E-08	5.27E-03
29	14	1.17006E-08	1.1709E-08	1.17027E-08	1.17E-08	5.25E-03
30	14.5	1.1662E-08	1.16711E-08	1.16643E-08	1.17E-08	5.24E-03
31	15	1.16233E-08	1.16331E-08	1.16259E-08	1.16E-08	5.22E-03
32	15.5	1.15845E-08	1.1595E-08	1.15878E-08	1.16E-08	5.20E-03
33	16	1.15459E-08	1.15568E-08	1.155E-08	1.16E-08	5.19E-03
34	16.5	1.15073E-08	1.15187E-08	1.15118E-08	1.15E-08	5.17E-03
35	17	1.14687E-08	1.14805E-08	1.14734E-08	1.15E-08	5.15E-03
36	17.5	1.14301E-08	1.14424E-08	1.14351E-08	1.14E-08	5.13E-03
37	18	1.13915E-08	1.14044E-08	1.13967E-08	1.14E-08	5.12E-03
38	18.5	1.13529E-08	1.13664E-08	1.13584E-08	1.14E-08	5.10E-03
39	19	1.13142E-08	1.13285E-08	1.13201E-08	1.13E-08	5.08E-03
40	19.5	1.12757E-08	1.12905E-08	1.12818E-08	1.13E-08	5.07E-03
41	20	1.1237E-08	1.12525E-08	1.12436E-08	1.12E-08	5.05E-03
42	20.5	1.11983E-08	1.12143E-08	1.12053E-08	1.12E-08	5.03E-03
43	21	1.11597E-08	1.11762E-08	1.11672E-08	1.12E-08	5.01E-03
44	21.5	1.11211E-08	1.11381E-08	1.11289E-08	1.11E-08	5.00E-03
45	22	1.10825E-08	1.11001E-08	1.10906E-08	1.11E-08	4.98E-03
46	22.5	1.10439E-08	1.10621E-08	1.10523E-08	1.11E-08	4.96E-03
47	23	1.10053E-08	1.1024E-08	1.1014E-08	1.10E-08	4.94E-03
48	23.5	1.09666E-08	1.0986E-08	1.09757E-08	1.10E-08	4.93E-03
49	24	1.0928E-08	1.0948E-08	1.09374E-08	1.09E-08	4.91E-03
50	24.5	1.08894E-08	1.09099E-08	1.08992E-08	1.09E-08	4.89E-03
51	25	1.08508E-08	1.08719E-08	1.08609E-08	1.09E-08	4.88E-03
52	25.5	1.08122E-08	1.08338E-08	1.08227E-08	1.08E-08	4.86E-03
53	26	1.07735E-08	1.07957E-08	1.07844E-08	1.08E-08	4.84E-03
54	26.5	1.07349E-08	1.07577E-08	1.07461E-08	1.07E-08	4.82E-03
55	27	1.06963E-08	1.07196E-08	1.07079E-08	1.07E-08	4.81E-03

56	27.5	1.06577E-08	1.06816E-08	1.06696E-08	1.07E-08	4.79E-03
57	28	1.06191E-08	1.06436E-08	1.06313E-08	1.06E-08	4.77E-03
58	28.5	1.05804E-08	1.06055E-08	1.0593E-08	1.06E-08	4.76E-03
59	29	1.05418E-08	1.05675E-08	1.05548E-08	1.06E-08	4.74E-03
60	29.5	1.05032E-08	1.05294E-08	1.05165E-08	1.05E-08	4.72E-03
61	30	1.04646E-08	1.04914E-08	1.04783E-08	1.05E-08	4.70E-03
62	30.5	1.04259E-08	1.04533E-08	1.044E-08	1.04E-08	4.69E-03
63	31	1.03873E-08	1.04153E-08	1.04017E-08	1.04E-08	4.67E-03
64	31.5	1.03487E-08	1.03772E-08	1.03634E-08	1.04E-08	4.65E-03
65	32	1.03101E-08	1.03392E-08	1.03252E-08	1.03E-08	4.63E-03
66	32.5	1.02715E-08	1.03011E-08	1.02869E-08	1.03E-08	4.62E-03
67	33	1.02328E-08	1.02631E-08	1.02486E-08	1.02E-08	4.60E-03
68	33.5	1.01942E-08	1.0225E-08	1.02104E-08	1.02E-08	4.58E-03
69	34	1.01556E-08	1.0187E-08	1.01721E-08	1.02E-08	4.57E-03
70	34.5	1.0117E-08	1.01489E-08	1.01338E-08	1.01E-08	4.55E-03
71	35	1.00784E-08	1.01109E-08	1.00956E-08	1.01E-08	4.53E-03
72	35.5	1.00397E-08	1.00728E-08	1.00573E-08	1.01E-08	4.51E-03
73	36	1.00011E-08	1.00348E-08	1.0019E-08	1.00E-08	4.50E-03
74	36.5	9.9625E-09	9.99671E-09	9.98074E-09	9.98E-09	4.48E-03
75	37	9.92388E-09	9.95867E-09	9.94247E-09	9.94E-09	4.46E-03
76	37.5	9.88526E-09	9.92062E-09	9.9042E-09	9.90E-09	4.45E-03
77	38	9.84664E-09	9.88257E-09	9.86593E-09	9.87E-09	4.43E-03
78	38.5	9.80802E-09	9.84452E-09	9.82767E-09	9.83E-09	4.41E-03
79	39	9.76939E-09	9.80647E-09	9.7894E-09	9.79E-09	4.39E-03
80	39.5	9.73077E-09	9.76842E-09	9.75113E-09	9.75E-09	4.38E-03
81	40	9.69215E-09	9.73037E-09	9.71286E-09	9.71E-09	4.36E-03
82	40.5	9.65353E-09	9.69232E-09	9.67459E-09	9.67E-09	4.34E-03
83	41	9.61491E-09	9.65427E-09	9.63632E-09	9.64E-09	4.33E-03
84	41.5	9.57629E-09	9.61622E-09	9.59805E-09	9.60E-09	4.31E-03
85	42	9.53767E-09	9.57817E-09	9.55978E-09	9.56E-09	4.29E-03

86	42.5	9.49905E-09	9.54012E-09	9.52151E-09	9.52E-09	4.27E-03
87	43	9.46043E-09	9.50207E-09	9.48324E-09	9.48E-09	4.26E-03
88	43.5	9.42181E-09	9.46402E-09	9.44497E-09	9.44E-09	4.24E-03
89	44	9.38319E-09	9.42597E-09	9.4067E-09	9.41E-09	4.22E-03
90	44.5	9.34456E-09	9.38792E-09	9.36843E-09	9.37E-09	4.20E-03
91	45	9.30594E-09	9.34987E-09	9.33016E-09	9.33E-09	4.19E-03
92	45.5	9.26732E-09	9.31182E-09	9.2919E-09	9.29E-09	4.17E-03
93	46	9.2287E-09	9.27377E-09	9.25363E-09	9.25E-09	4.15E-03
94	46.5	9.19008E-09	9.23573E-09	9.21536E-09	9.21E-09	4.14E-03
95	47	9.15146E-09	9.19768E-09	9.17709E-09	9.18E-09	4.12E-03
96	47.5	9.11284E-09	9.15963E-09	9.13882E-09	9.14E-09	4.10E-03
97	48	9.07422E-09	9.12158E-09	9.10055E-09	9.10E-09	4.08E-03
98	48.5	9.0356E-09	9.08353E-09	9.06228E-09	9.06E-09	4.07E-03
99	49	8.99698E-09	9.04548E-09	9.02401E-09	9.02E-09	4.05E-03
100	49.5	8.95836E-09	9.00743E-09	8.98574E-09	8.98E-09	4.03E-03
101	50	8.91974E-09	8.96938E-09	8.94747E-09	8.95E-09	4.02E-03
102	50.5	8.88111E-09	8.93133E-09	8.9092E-09	8.91E-09	4.00E-03
103	51	8.84249E-09	8.89328E-09	8.87093E-09	8.87E-09	3.98E-03
104	51.5	8.80387E-09	8.85523E-09	8.83266E-09	8.83E-09	3.96E-03
105	52	8.76525E-09	8.81718E-09	8.7944E-09	8.79E-09	3.95E-03
106	52.5	8.72663E-09	8.77913E-09	8.75613E-09	8.75E-09	3.93E-03
107	53	8.68801E-09	8.74108E-09	8.71786E-09	8.72E-09	3.91E-03
108	53.5	8.64939E-09	8.70303E-09	8.67959E-09	8.68E-09	3.90E-03
109	54	8.61077E-09	8.66498E-09	8.64132E-09	8.64E-09	3.88E-03
110	54.5	8.57215E-09	8.62693E-09	8.60305E-09	8.60E-09	3.86E-03
111	55	8.53353E-09	8.58888E-09	8.56478E-09	8.56E-09	3.84E-03
112	55.5	8.49491E-09	8.55084E-09	8.52651E-09	8.52E-09	3.83E-03
113	56	8.45628E-09	8.51279E-09	8.48824E-09	8.49E-09	3.81E-03
114	56.5	8.41766E-09	8.47474E-09	8.44997E-09	8.45E-09	3.79E-03
115	57	8.37904E-09	8.43669E-09	8.4117E-09	8.41E-09	3.78E-03

116	57.5	8.34042E-09	8.39864E-09	8.37343E-09	8.37E-09	3.76E-03
117	58	8.3018E-09	8.36059E-09	8.33516E-09	8.33E-09	3.74E-03
118	58.5	8.26318E-09	8.32254E-09	8.2969E-09	8.29E-09	3.72E-03
119	59	8.22456E-09	8.28449E-09	8.25863E-09	8.26E-09	3.71E-03
120	59.5	8.18594E-09	8.24644E-09	8.22036E-09	8.22E-09	3.69E-03
121	60	8.14732E-09	8.20839E-09	8.18209E-09	8.18E-09	3.67E-03
122	60.5	8.1087E-09	8.17034E-09	8.14382E-09	8.14E-09	3.65E-03
123	61	8.07008E-09	8.13229E-09	8.10555E-09	8.10E-09	3.64E-03
124	61.5	8.03145E-09	8.09424E-09	8.06728E-09	8.06E-09	3.62E-03
125	62	7.99283E-09	8.05619E-09	8.02901E-09	8.03E-09	3.60E-03
126	62.5	7.95421E-09	8.01814E-09	7.99074E-09	7.99E-09	3.59E-03
127	63	7.91559E-09	7.98009E-09	7.95247E-09	7.95E-09	3.57E-03
128	63.5	7.87697E-09	7.94204E-09	7.9142E-09	7.91E-09	3.55E-03
129	64	7.83835E-09	7.90399E-09	7.87593E-09	7.87E-09	3.53E-03
130	64.5	7.79973E-09	7.86595E-09	7.83766E-09	7.83E-09	3.52E-03
131	65	7.76111E-09	7.8279E-09	7.7994E-09	7.80E-09	3.50E-03
132	65.5	7.72249E-09	7.78985E-09	7.76113E-09	7.76E-09	3.48E-03
133	66	7.68387E-09	7.7518E-09	7.72286E-09	7.72E-09	3.47E-03
134	66.5	7.64525E-09	7.71375E-09	7.68459E-09	7.68E-09	3.45E-03
135	67	7.60663E-09	7.6757E-09	7.64632E-09	7.64E-09	3.43E-03
136	67.5	7.568E-09	7.63765E-09	7.60805E-09	7.60E-09	3.41E-03
137	68	7.52938E-09	7.5996E-09	7.56978E-09	7.57E-09	3.40E-03
138	68.5	7.49076E-09	7.56155E-09	7.53151E-09	7.53E-09	3.38E-03
139	69	7.45214E-09	7.5235E-09	7.49324E-09	7.49E-09	3.36E-03
140	69.5	7.41352E-09	7.48545E-09	7.45497E-09	7.45E-09	3.35E-03
141	70	7.3749E-09	7.4474E-09	7.4167E-09	7.41E-09	3.33E-03
142	70.5	7.33628E-09	7.40935E-09	7.37843E-09	7.37E-09	3.31E-03
143	71	7.29766E-09	7.3713E-09	7.34016E-09	7.34E-09	3.29E-03
144	71.5	7.25904E-09	7.33325E-09	7.3019E-09	7.30E-09	3.28E-03
145	72	7.22042E-09	7.2952E-09	7.26363E-09	7.26E-09	3.26E-03

146	72.5	7.1818E-09	7.25715E-09	7.22536E-09	7.22E-09	3.24E-03
147	73	7.14317E-09	7.2191E-09	7.18709E-09	7.18E-09	3.22E-03
148	73.5	7.10455E-09	7.18105E-09	7.14882E-09	7.14E-09	3.21E-03
149	74	7.06593E-09	7.14301E-09	7.11055E-09	7.11E-09	3.19E-03
150	74.5	7.02731E-09	7.10496E-09	7.07228E-09	7.07E-09	3.17E-03
151	75	6.98869E-09	7.06691E-09	7.03401E-09	7.03E-09	3.16E-03
152	75.5	6.95007E-09	7.02886E-09	6.99574E-09	6.99E-09	3.14E-03
153	76	6.91145E-09	6.99081E-09	6.95747E-09	6.95E-09	3.12E-03
154	76.5	6.87283E-09	6.95276E-09	6.9192E-09	6.91E-09	3.10E-03
155	77	6.83421E-09	6.91471E-09	6.88093E-09	6.88E-09	3.09E-03
156	77.5	6.79559E-09	6.87666E-09	6.84266E-09	6.84E-09	3.07E-03
157	78	6.75697E-09	6.83861E-09	6.8044E-09	6.80E-09	3.05E-03
158	78.5	6.71835E-09	6.80056E-09	6.76613E-09	6.76E-09	3.04E-03
159	79	6.67972E-09	6.76251E-09	6.72786E-09	6.72E-09	3.02E-03
160	79.5	6.6411E-09	6.72446E-09	6.68959E-09	6.69E-09	3.00E-03
161	80	6.60248E-09	6.68641E-09	6.65132E-09	6.65E-09	2.98E-03
162	80.5	6.56386E-09	6.64836E-09	6.61305E-09	6.61E-09	2.97E-03
163	81	6.52524E-09	6.61031E-09	6.57478E-09	6.57E-09	2.95E-03
164	81.5	6.48662E-09	6.57226E-09	6.53651E-09	6.53E-09	2.93E-03
165	82	6.448E-09	6.53421E-09	6.49824E-09	6.49E-09	2.92E-03
166	82.5	6.40938E-09	6.49616E-09	6.45997E-09	6.46E-09	2.90E-03
167	83	6.37076E-09	6.45812E-09	6.4217E-09	6.42E-09	2.88E-03
168	83.5	6.33214E-09	6.42007E-09	6.38343E-09	6.38E-09	2.86E-03
169	84	6.29352E-09	6.38202E-09	6.34516E-09	6.34E-09	2.85E-03
170	84.5	6.25489E-09	6.34397E-09	6.3069E-09	6.30E-09	2.83E-03