



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA SPEKTRUM PENGUKURAN PADA TABUNG PESAWAT  
SINAR X YT.U 320-D03 DENGAN METODE SIMULASI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains**

**AHMAD FAUZI**

**0606067995**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
PEMINATAN FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA  
DEPOK  
DESEMBER 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Ahmad Fauzi**

**NPM : 0606067995**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal :**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Ahamd Fauzi  
NPM : 0606067995  
Program Studi : Fisika  
Judul Skripsi : Analisis Spektrum Pengukuran pada Tabung Pesawat Sinar X Y.TU 320 D03 dengan Metode Simulasi

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dwi Seno K, M.Si (.....)  
Pembimbing : Heru Prasetyo, M.Si (.....)  
Penguji : Dr. Seruni U Fresilebeen (.....)  
Penguji : Kristina Tri Wigati, M.Si (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : November 2010

## KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah Azza Wajalla, yang menciptakan bumi dan langit, yang menggantikan siang dan malam, seluruh gerakan benda-benda langit tunduk dan patuh pada perintahNya, semua makhluk berada dalam pengawasannya. Zat yang maha mulia penuh dengan kemuliaan. Sholawat serta salam tercurah pada insan pujaan, manusia termulia sepanjang zaman beliaulah Nabi Muhammad SAW sebagai tauladan bagi umat manusia.

Seluruh daya dan upaya telah penulis kerahkan, raga tak henti bekerja keras, jiwa tak kenal lelah untuk mengupayakan sebuah perjuangan perkuliahan sampai akhirnya tibalah penulis menyelesaikan tugas akhir ini. Dengan segala keterbatasan, sebuah perjalanan panjang dan penuh pengalaman kehidupan bagi penulis. Mudah-mudahan semua perjuangan ini di nilai sebagai ibadah di hadapan Allah dan menjadi suatu proses untuk menjadi lebih dewasa demi sebuah keyakinan dan pengamalan atas ilmu yang di titipkan

Sadar akan keterbatasan dalam penyusunan skripsi ini, penulispun ingin mengucapkan terima kasih kepada

1. Bapak Heru Prasetyo M.Si Peneliti BATAN, selaku pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu, memberikan tenaga dan pikiran, saran,serta solusi permasalahan yang di hadapi penulis.
2. Bapak Dwi Seno K M.Si selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, saran dan pendapat untuk penulis sehingga menjadikan skripsi ini menjadi lebih baik lagi.
3. Ibu Dr. Seruni U Fresilebeen selaku penguji I yang telah memberi kontribusi dalam pengerjaan skripsi dan memberikan banyak revisi.
4. Ibu Kristina Tri Wigati, M.Si selaku penguji II yang telah memberikan masukan positif dan merevisi secara detail.
5. Seluruh staf pengajar Departemen Fisika yang telah mentransfer Ilmu Fisika mudah-mudahan ilmu ini dapat bermanfaat di dunia sampai akhirat. Khususnya kepada Dr. Budhi Kurniawan sebagai dosen sekaligus pembimbing spritual penulis selama di kampus.

6. Ayahanda (Alm) tercinta dan Ibunda tersayang. atas segala pengorbanan, mendoakan, dan menyekolahkan sampai akhirnya ananda dapat kuliah. hanya ini yang ananda bisa lakukan, Keluarga penulis, Bang Aming, Aziz keponakan penulis yang telah meminjamkan computer.
7. Teman-teman Fisika06 Andika, Agus, Intan, Lisday, dan yang lainnya atas segala seluruh bantuan yang telah di berikan sejak semasa perkuliahan sampai selesainya penyusunan skripsi ini. Teman-teman Fisika05 Koko yang selalu mengirimkan email yang penulis butuhkan. Ira dan Ica yang banyak memberikan bantuan dan saran kepada penulis.
8. Dan seluruh pihak yang penulis tidak dapat sebutkan satu-persatu, cukuplah Allah yang maha mengetahui dan membalas kebaikan kalian semua.

penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi pembaca.

Desember 2010

Ahmad Fauzi

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

---

---

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

Nama : Ahmad Fauzi  
NPM : 0606067995  
Program Studi : Fisika  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis Karya : Skripsi

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

Analisa Spektrum Pengukuran pada Tabung Pesawat Sinar X Y.TU 320-D03  
dengan Metode Simulasi

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di :

Pada Tanggal :

Yang menyatakan

(.....)

## ABSTRAK

Nama : Ahmad Fauzi  
Program Studi : Fisika  
Judul : Analisa Spektrum Pengukuran pada Tabung Pesawat Sinar X  
Y.TU 320-D03 dengan Metode Simulasi .

Telah di lakukan simulasi Monte Carlo untuk mencari spektrum energi dari pesawat Sinar X Y.TU-320 D03 pada CdTe dengan penggunaan tegangan tabung sesuai dengan rentang RQR pada TRS 457 yakni 40 kV, 50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV dan 150 kV. pemodelan detector CdTe mengikuti geometri detector XR 100-T CdTe. Model Sinar X di tempatkan pada jarak 100 cm dari detector. Ketebalan CdTe sebesar 1 mm dan berjari-jari sebesar 0.15 mm. penelitian ini menggunakan dua buah software yaitu Xcomp5r dan EGSnrc. Xcomp5r di gunakan sebagai sumber radiasi Sinar X (input) dan EGS sebagai software Monte Carlo. Selanjutnya EGSnrc menghasilkan spektrum energi sinar X pada CdTe dan sekitarnya, hasilnya bahwa interaksi radiasi dengan atom Cd dan Te pada simulasi Monte Carlo terlihat jelas bila di bandingkan dengan spektrum pengukuran menggunakan detector XR 100-T CdTe. Terdapat Sinar X fluoresensi kulit K dari atom Cd dan Te pada energi sekitar 24 keV dan 28 keV. Karena simulasi Monte Carlo memiliki ketelitian sampai 1 keV sehingga sulit membedakan Sinar X fluoresensi pada energi yang berdekatan. verifikasi spektrum juga di lakukan di antaranya berdasarkan energi rata-rata dan spektrum di sekitar CdTe.

Kata Kunci : Simulasi monte carlo, spektrum sinar-X, *mean energy*, detektor CdTe, Xcomp5r  
xiii+51 halaman ; 13 gambar; 7 tabel  
Daftar Acuan : 9 (2004-2010)

## ABSTRACT

Name : Ahmad Fauzi  
Study Program: Physics  
Title : Analysis of Spectrum Measurement on X-Ray Tube Y.TU 320-D03 Based on Simulation Methode

Have been studied Monte Carlo simulation to find energy spectrum of X-ray machine Y.TU-320 D03 on CdTe based on x-ray tube voltage according to RQR TRS No. 457, such as 40 kV, 50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV and 150 kV. CdTe modeling, that has been studied, followed geometry of XR 100-T CdTe detector. X-ray model was placed on 100 cm distance far away from detector. The thickness of CdTe is 1 mm and its radius is 0.15 mm. there are two softwares were used to finish this study. Those softwares are Xcomp5r and EGSnrc. Xcomp5r was used as x-ray sources (input) and the other software, EGSnrc, as Monte Carlo software. For the next, EGSnrc has built x-ray spectrum on CdTe and its around. The result showed that radiation interaction with CdTe atoms on Monte Carlo simulation has been clearly appeared rather than x-ray measurement using XR 100-T CdTe detector. There are K-shell fluorescence X-ray of Cd and Te atom with its energy about 24 keV and 28 keV. Because of Monte Carlo has a high precision until 1 keV, therefore it's hard to make difference fluorescence x-ray which have closer energies. Spectrum verification has been studied also based on mean energy and spectrum around CdTe.

Keywords : Monte Carlo simulation, x-ray spectra, mean energy, CdTe Detector, Xcomp5r  
xiii+51 pages ; 13 pictures; 7 tables  
Bibliography : 9 (2004-2010)



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINAL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB 1</b>	
<b>PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika penulisan.....	2
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Produksi Sinar X.....	4
2.2 Interaksi Radiasi dengan Materi.....	6
2.2.1 Efek Fotolistrik.....	6
2.2.2 Hamburan Compton.....	8
2.2.3 Fluorisensi Berkas Sinar X.....	9
2.3 Alat Ukur Radiasi .....	10
2.3.1 Detektor CdTe.....	10
2.3.2 Teori Operasi.....	11
2.4 Penentuan Spektrum Energi Menggunakan Xcomp5r .....	12
2.5 Simulasi Metode Monte Carlo Menggunakan EGSnrc.....	12

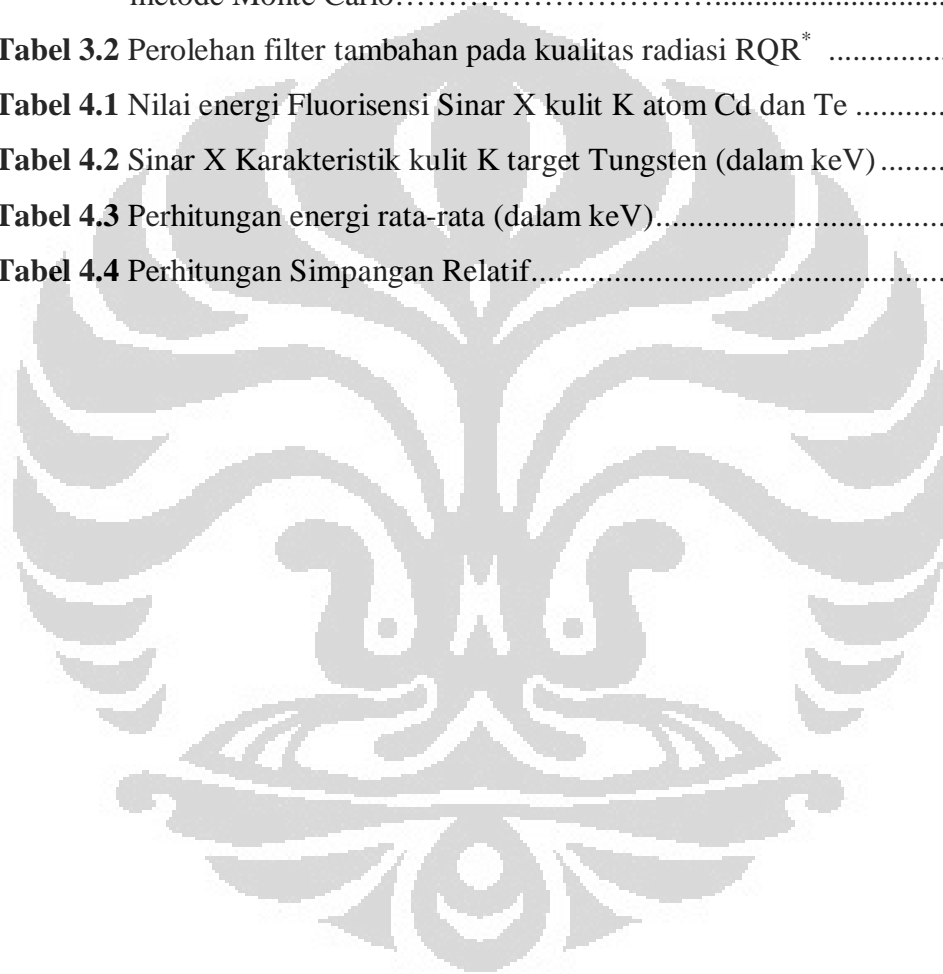
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>15</b>
3.1 Alat dan Bahan.....	15
3.2 Metode Simulasi.....	17
3.2.1 Penentuan spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Xcomp5r.....	17
3.2.2 Pengambilan Data Spektrum Energi Sinar X Simulasi Monte Carlo Menggunakan EGSnrc.....	18
3.3 Verifikasi Spektrum Energi Hasil Simulasi.....	19
3.4 Perhitungan Mean Energi.....	19
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>20</b>
4.1 Hasil Pengukuran Spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Xcomp5r .....	20
4.2 Hasil Pengukuran Spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Monte Carlo.....	22
4.3 Verifikasi Spektrum simulasi Monte Carlo dengan Spektrum Simulasi Xcom.....	28
4.3.1 Perhitungan Energi Rata-rata.....	28
4.3.2 Pola Perubahan Spektrum Detektor CdTe Simulasi Monte Carlo.....	31
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>33</b>
5.1 Kesimpulan.....	33
5.2 Saran.....	33
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>34</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>35</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Skema tabung pesawat sinar-x.....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Transisi elektron pada kulit yang berbeda di sertai pemancaran Sinar X Karakteristik.....	6
<b>Gambar 2.3</b>	Fenomena Fotolistrik.....	8
<b>Gambar 2.4</b>	Proses terjadinya Hamburan Compton pada medium.....	9
<b>Gambar 2.5</b>	a. Proses Fluorresensi Sinar X kulit K, b. Proses fluorresensi Sinar X kulit L.....	10
<b>Gambar 2.6</b>	Tampilan Software EGSnrc.....	14
<b>Gambar 3.1</b>	Model Geometri Detektor XR-100 T CdTe.....	16
<b>Gambar 4.1</b>	Spektrum energi hasil simulasi Xcomp5r pada beberapa tegangan tabung.....	22
<b>Gambar 4.2</b>	Spektrum energi Pada CdTe hasil simulasi pada beberapa tegangan tabung .....	24
<b>Gambar 4.3</b>	Spektrum gabungan antara percobaan (exp), detektor CdTe (MC), hanya material CdTe.....	26
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik efisiensi detector XR 100 T CdTe.....	27
<b>Gambar 4.5</b>	Spektrum gabungan di normalisasi berdasarkan energi rata-rata.....	30
<b>Gambar 4.6</b>	Perubahan spektrum energi pada simulasi Monte Carlo.....	32

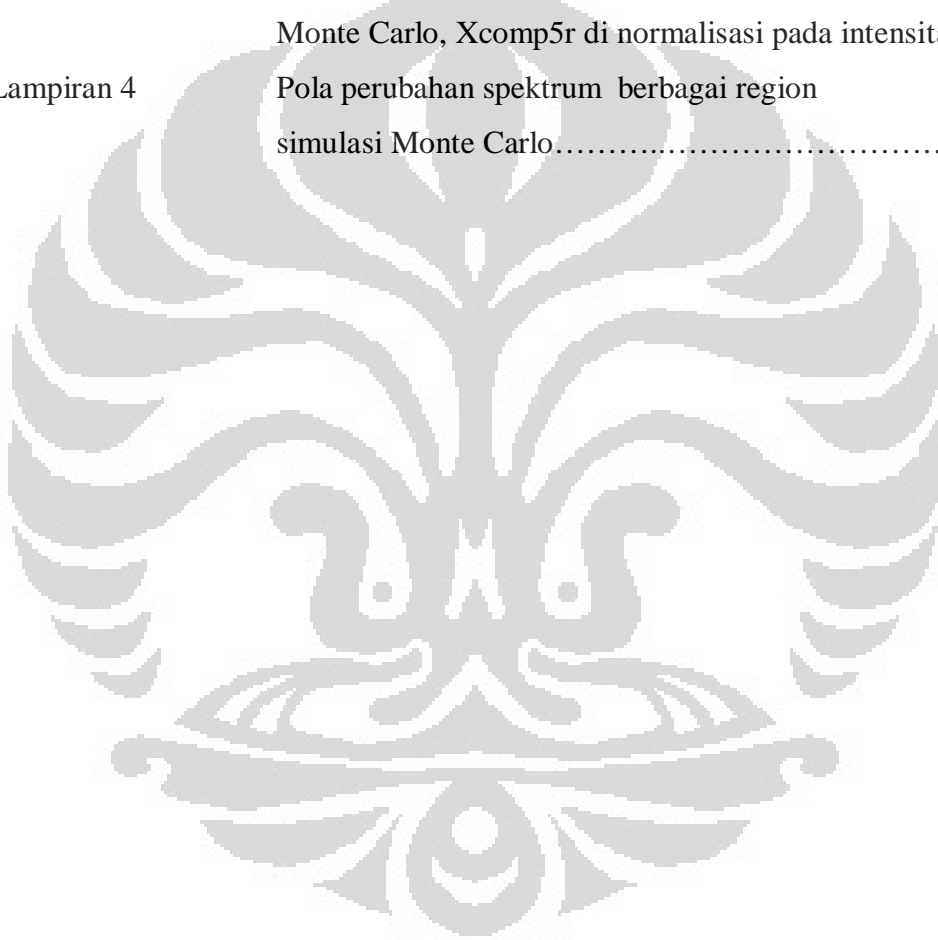
## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1</b> Perbandingan material detektor CdTe dengan material Si dan Ge. ....	11
<b>Tabel 3.1</b> Parameter Fisik dalam simulasi EGSnrcMP metode Monte Carlo.....	17
<b>Tabel 3.2</b> Perolehan filter tambahan pada kualitas radiasi RQR* .....	18
<b>Tabel 4.1</b> Nilai energi Fluorisensi Sinar X kulit K atom Cd dan Te .....	25
<b>Tabel 4.2</b> Sinar X Karakteristik kulit K target Tungsten (dalam keV) .....	27
<b>Tabel 4.3</b> Perhitungan energi rata-rata (dalam keV).....	29
<b>Tabel 4.4</b> Perhitungan Simpangan Relatif.....	29



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Spektrum gabungan Experimen, MC, MC Di normalisasi berdasarkan energi rata-rata Xcomp5r.....	35
Lampiran 2	PerhitunSpektrum hasil pengiukuran menggunakan detektor XR 100-T CdTe.....	38
Lampiran 3	Data PengSpektrum gabungan eksperimen, Monte Carlo, Xcomp5r di normalisasi pada intensitas.....	41
Lampiran 4	Pola perubahan spektrum berbagai region simulasi Monte Carlo.....	44



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Penggunaan radiasi Sinar X saat ini semakin pesat, khususnya di bidang kedokteran. Dengan adanya Sinar X kebutuhan pengobatan penyakit tanpa pembedahan semakin terpenuhi. Pada bagian radiologi maupun radioterapi sinar-x memiliki peranan penting. Hasil yang di dapat dari penggunaan radiasi ini berupa pencitraan, pencitraan yang di dasarkan pada radiasi ini menginginkan kualitas Sinar X yang di gunakan sesuai dengan harapan. Karena dari hasil pencitraan ini akan di ambil kesimpulan atau diagnosa suatu kelaianan pada tubuh pasien.

Pengetahuan tentang spektrum energi sangat penting. Dengan pengetahuan tentang spektrum energi yang dihasilkan pesawat Sinar X, maka akan diketahui tegangan efektif yang digunakan dalam pengukuran menggunakan detektor. Dengan penggunaan tegangan efektif tersebut maka akan didapat informasi yang lebih akurat. Dari informasi ini akan diambil kesimpulan tentang karakteristik detektor yang digunakan.

Pada penelitian ini Metode Monte Carlo digunakan karena Metode Monte Carlo dapat mensimulasikan kondisi eksperimen lebih realistis untuk menentukan spektrum Sinar X dibandingkan bila menentukan spektrum Sinar X dengan menggunakan sistem spektroskopi yang memerlukan koreksi medium detektor yang digunakan. Dengan simulasi Monte Carlo penentuan spektrum Sinar X langsung dapat dilakukan pada medium udara, oleh karena itu dengan metode Monte Carlo tidak diperlukan koreksi medium detektor pada sistem spektroskopi. Dengan kelebihan ini di harapkan dapat terlihat spektrum di udara. Salah satu program simulasi Monte Carlo yang di gunakan penulis adalah EGSnrc.

### **1.2 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan menganalisa spektrum hasil pengukuran dengan Metode Simulasi menggunakan EGSnrc

### **1.3 Batasan Masalah**

Penelitian ini dilakukan dengan Metode Simulasi menggunakan EGSnrc, dengan maksud mendapatkan spektrum Sinar X dengan model detektor CdTe pada jarak 100 cm dari tabung Sinar X. Dengan batasan penggunaan tegangan tabung sinar-X sesuai dengan rentang (*Radiation Qualities in a Conventional Radiodiagnostic*) RQR pada (*Technical Report Series*) TRS 457 yakni 40 KV, 50 KV, 60 KV, 70 KV, 80 KV, 90 KV, 100 KV, 120 KV, dan 150 KV<sup>8</sup>.

### **1.4 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan ini dibagi menjadi 5 bab, dan setiap bab terdiri dari beberapa sub-bab guna mempermudah penjelasan tiap bagiannya. Dengan uraian sebagai berikut :

#### **Bab 1. Pendahuluan**

Bagian ini berisi tentang penjelasan secara umum yang menjadi latar belakang penelitian, pembatasan masalah yang ingin diselesaikan, tujuan penelitian, serta sistematika penulisan penelitian ini.

#### **Bab 2. Tinjauan Pustaka**

Bagian ini berisi tentang teori-teori yang mendasari dan mendukung proses penelitian. Termasuk juga teori yang menggambarkan karakteristik perangkat maupun peralatan yang digunakan.

#### **Bab 3. Metodologi Penelitian**

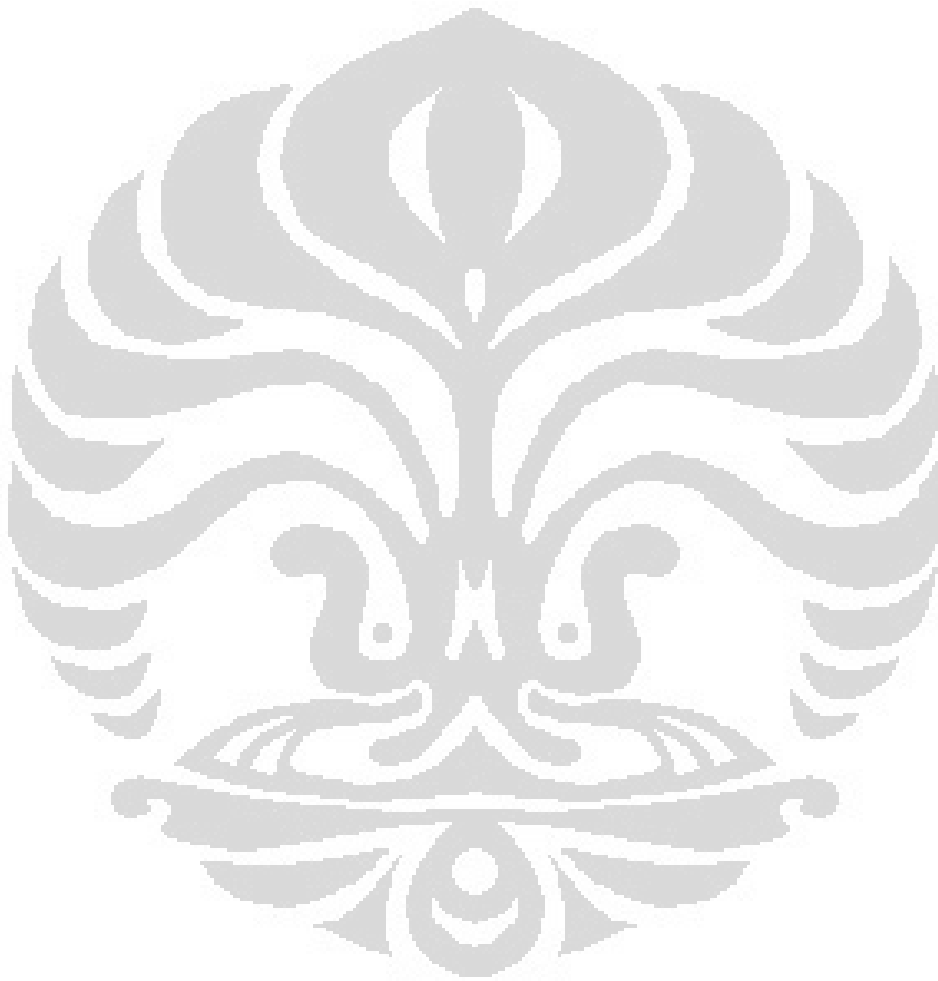
Bagian ini berisi tentang tata laksana dalam mencapai tujuan penelitian. Mulai dari hal-hal yang perlu disiapkan hingga peralatan atau sarana yang digunakan. Pada bagian ini juga akan dijelaskan cara kerja yang dilakukan hingga diperolehnya sebuah data yang menjadi tujuan penelitian ini.

#### **Bab 4. Hasil dan Pembahasan**

Bagian ini berisi data maupun hasil yang didapat dari proses kerja penelitian akan disajikan dan dibahas secara sistematis dalam bab ini.

### Bab 5. Penutup

Merupakan bagian yang berisi tentang kesimpulan penelitian yang telah dilakukan, serta saran-saran yang berguna untuk proses pengembangan selanjutnya.





## BAB 2

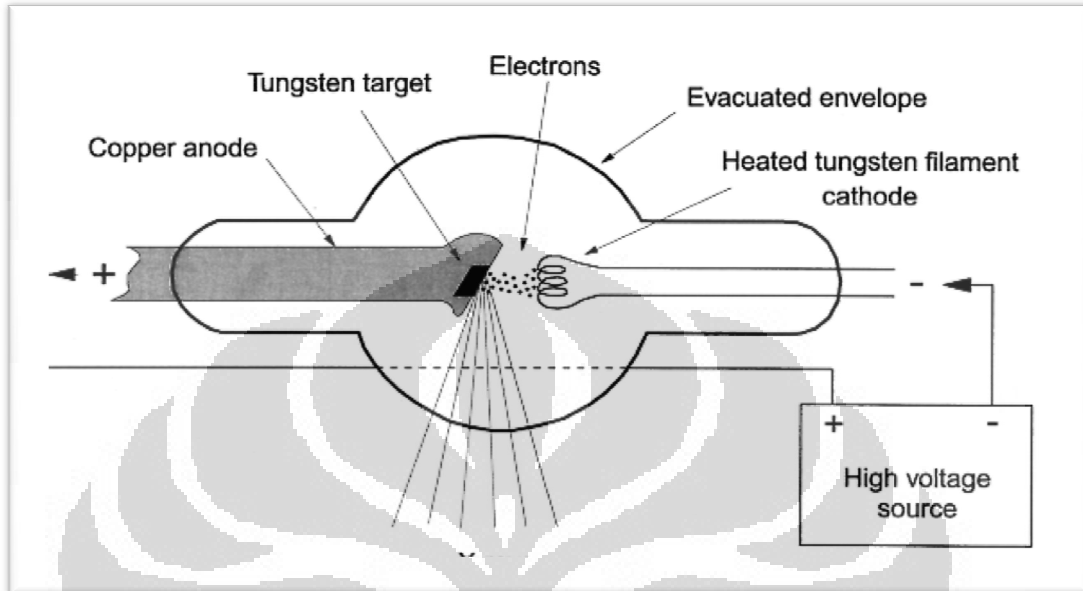
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Produksi Sinar-X

Dalam tahun 1895 Wilhelm Roentgen mendapatkan bahwa radiasi yang daya kemampuannya tembusnya besar sifatnya belum di ketahui (di namakan Sinar X), ditimbulkan jika elektron cepat menumbuk materi. Bertambah cepat elektron semula, bertambah hebat kemampuan tembus Sinar X dan bertambah banyak jumlah elektron, bertambah besar pula intensitas berkas Sinar X yang di hasilkan<sup>2</sup>.

Produksi Sinar X terjadi didalam sebuah tabung hampa udara bertekanan rendah, di perhatikan pada gambar 2.1. Di dalam tabung Sinar X ada yang bagian Anoda dan Katoda. Anoda merupakan material target yang akan ditumbuk oleh elektron berkecepatan tinggi. Katoda merupakan bagian penghasil elektron terdiri dari Tungsten dalam bentuk kumparan. Elektron yang berada dalam atom material katoda terionisasi ketika beda potensial diberikan pada tabung. Sejumlah elektron berkecepatan tinggi akan menumbuk anoda sebagai target. Target yang di gunakan merupakan medium dengan nomor atom  $Z$  yang tinggi dan memiliki konduktivitas termal yang baik. Tumbukan antara elektron dengan target akan menghasilkan foton Sinar X yang di fokuskan melalui *window* tipis dan keluar dari tabung.

Terbentuknya Sinar X dapat terjadi apabila partikel bermuatan misalnya elektron mengalami perlambatan yang diakibatkan adanya interaksi dengan materi, diperlihatkan pada gambar 2.1. Sinar X yang demikian dikenal dengan Sinar X Bremsstrahlung. Sinar X Bremsstrahlung memiliki energi yang tinggi yang besarnya sama dengan energi kinetik partikel bermuatan pada awal terjadinya perlambatan.



**Gambar 2.1** Skema tabung pesawat sinar-x

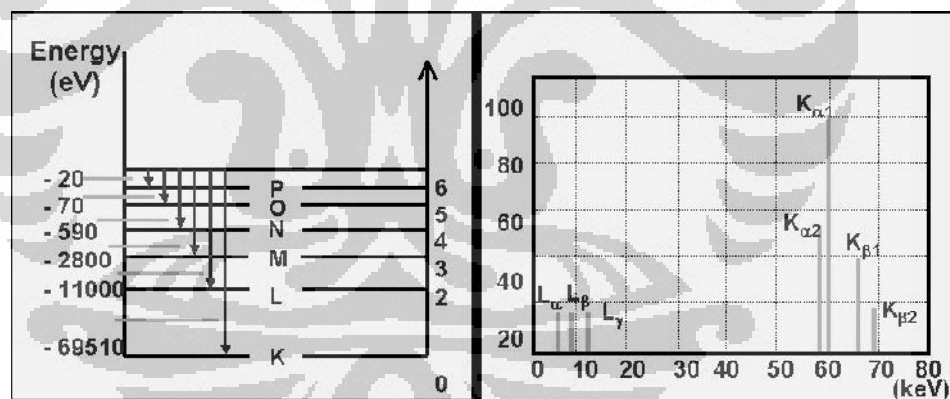
Jenis Sinar X yang lain adalah Sinar X karakteristik, yakni Sinar X yang di hasilkan dari transisi elektron pada atom target. Sinar X di pancarkan dalam transisi antara berbagai tingkat energi terisi yang lebih rendah dari sebuah atom. Elektron-elektron terdalam terikat sedemikian kuatnya sehingga ukuran lebar antara tingkat memadai untuk pemancaran foton dalam rentang panjang gelombang Sinar X. Sebaliknya, elektron-elektron terluar relatif lebih lemah, dan lebar antara tingkat energinya hanyalah beberapa elektron volt. dengan demikian transisi antara tingkat-tingkat ini hanya memberikan foton dalam spektrum cahaya tampak.

Ketika satu elektron dari subkulit  $1s$  keluar, maka elektron dari subkulit yang lebih tinggi akan segera bertransisi mengisi kekosongan tersebut. energi foton sama dengan beda energi keadaan awal dan akhir elektron yang bertransisi. Telah di sepakati bahwa kulit  $n=1$  sebagai kulit K. ketika membebaskan elektron  $1s$ , akan tercipta suatu kekosongan di kulit K. Semua Sinar X yang di pancarkan

dalam proses mengisi kekosongan ini di kenal dengan sebagai Sinar X kulit  $K$ . Sinar X yang bersal dari kulit  $n=2$  (kulit L) di kenal sebagai Sinar- $X_{\alpha}$ , dan Sinar X kulit K yang berasal dari tingkat-tingkat yang lebih tinggi di kenal dengan  $K_{\beta}$ ,  $K_{\gamma}$  dan seterusnya

Sinar X dapat pula terjadi penembakan atom dengan berkas elektron di kulit L, dan elektron-elektron dari subkulit yang lebih tinggi akan segera bertransisi. Foton yang dipancarkan dalam berbagai transisi ini di kenal dengan sebagai Sinar X L. Sinar X deret L berenergi rendah di kenal sebagai  $L_{\alpha}$ . Kekosongan yang berda pada kulit terluarnya lagi akan segera terjadi sisi kembali dengan pemancaran sinar-X  $L_{\beta}$ ,  $L_{\gamma}$  dan seterusnya. Lihat gambar 2.2

Pesawat sinar-X berenergi tinggi (orde MV) di kenal dengan nama pemercepat Linear (LINAC). Sinar X yang dipancarkan pesawat pemercepat partikel memiliki energi yang lebih seragam bila di banding dengan pesawat pemercepat elektron berenergi rendah. Target yang digunakan juga lebih tipis sehingga energi yang di pancarkan Sinar X hampir sama.



Gambar 2.2 Transisi elektron pada kulit yang berbeda di sertai pemancaran Sinar X Karakteristik.

## 2.2 .Interaksi Radiasi Terhadap Materi

### 2.2.1 Efek Fotolistrik.

Efek fotolistrik adalah keluarnya elektron-elektron dari permukaan logam ketika logam tersebut dikenai seberkas cahaya. Elektron yang keluar disebut

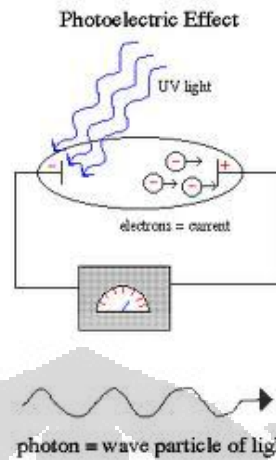
elektron foto. Efek fotolistrik pertama kali ditemukan oleh Hertz. Namun berhasil dijelaskan dengan baik oleh Einstein pada tahun 1905 dengan memandang cahaya sebagai paket-paket energi yang disebut foton. Elektron-elektron didekat permukaan logam terikat dalam struktur atom. Besar energi ikatan ini bergantung pada jenis logam, dan disebut sebagai energi ambang atau fungsi kerja. Jika energi  $hf$  dari foton cahaya yang datang lebih kecil dari pada energi ambang logam  $W_0$ , maka elektron-elektron tidak akan keluar dari permukaan logam, berapapun intensitas yang di berikan. Tetapi dengan mengganti dengan cahaya yang frekuensinya lebih tinggi atau mennganti logam dengan energi ambang yang lebih kecil, sedemikian sehingga energi foton lebih besar dari energi ambang maka akan menyebabkan elektron-elektron keluar dari permukaan logam walaupun intensitasnya kecil. Kondisi ini intensitas cahaya akan menentukan jumlah elektron yang keluar dari permukaan logam. Makin besar intensitas cahaya makin banyak foton yang bertumbukan dengan elektron-elektron dekat permukaan logam. Sebagai hasilnya semakin banyak elektron yang keluar dari permukaan logam<sup>2</sup>.

Untuk elektron yang sangat dekat dengan permukaan logam, maka begitu lepas dari ikatannya, elektron bebas ini segera keluar dengan kecepatan tertentu dari permukaan. Elektron bebas dengan dengan keadaan seperti ini dikatakan memiliki energi kinetik maksimum. Besar energi kinetik maksimum sama dengan selisih energi foton  $hf$  dengan energi ambang  $W_0$  dengan demikian persamaan yang berlaku bagi efek foto listrik adalah

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h \frac{c}{\lambda} - h \frac{c}{\lambda_0} \quad (2.1)$$

Dengan

- $m$  = massa elektron (kg)
- $v_m$  = kelajuan maksimum elektron (m/s)
- $\lambda$  = panjang gelombang foton (m)
- $\lambda_0$  = panjang gelombang ambang logam (m)
- $c$  = kecepatan cahaya  $3.10^8$  m/s
- $h$  = konstanta plank  $6,6. 10^{-34}$  J.s



**Gambar 2.3** Fenomena Fotolistrik

### 2.2.2. Efek Compton

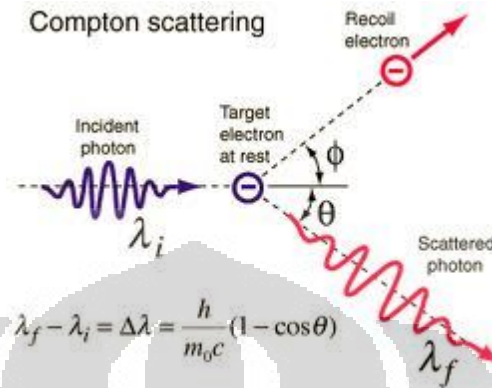
Cara lain radiasi berinteraksi dengan atom adalah melalui Efek Compton, dimana radiasi di hamburkan oleh elektron hamper bebas yang terikat lemah pada atomnya. Sebagian energi radiasi diberikan kepada elektron, sehingga terlepas dari atom. Energi yang sisa diradiasikan kembali sebagai radiasi elektromagnetik. Menurut gambaran gelombang, energi rasdiasi yang dipancarkan itu lebih kecil dari pada energi radiasi yang datang (selisihnya berubah menjadi energi kinetik elektron), namun panjang gelombangnya tetap sama<sup>2</sup>.

Namun konsep foton meramalkan konsep yang berbeda, proses hamburan ini di analisa sebagai suatu interaksi antara sebuah foton dan sebuah elektron. Gambar 2.1 memperlihatkan peristiwa Efek Compton. Pada keadaan awal, foton memiliki energi  $E$  yang di berikan oleh elektron, pada keadaan diam, memiliki energi diam  $m_e c^2$ .

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

Setelah hamburan foton memiliki energi  $E'$  dan momentum  $P'$  dan bergerak pada arah yang membuat sudut  $\theta$  terhadap foton yang datang. Elektron memiliki energi

total  $E_e$  dan momentum  $P_e$  dan bergerak pada arah yang membuat sudut  $\phi$  terhadap foton yang datang.



**Gambar 2.4** Proses terjadinya Hamburan Compton pada medium

dalam interaksi ini berlaku persyaratan kekekalan energi dan momentum, yakni

$$E_{\text{awal}} = E_{\text{akhir}} \quad (2.3)$$

$$P_{\text{awal}} = P_{\text{akhir}} \quad (2.4)$$

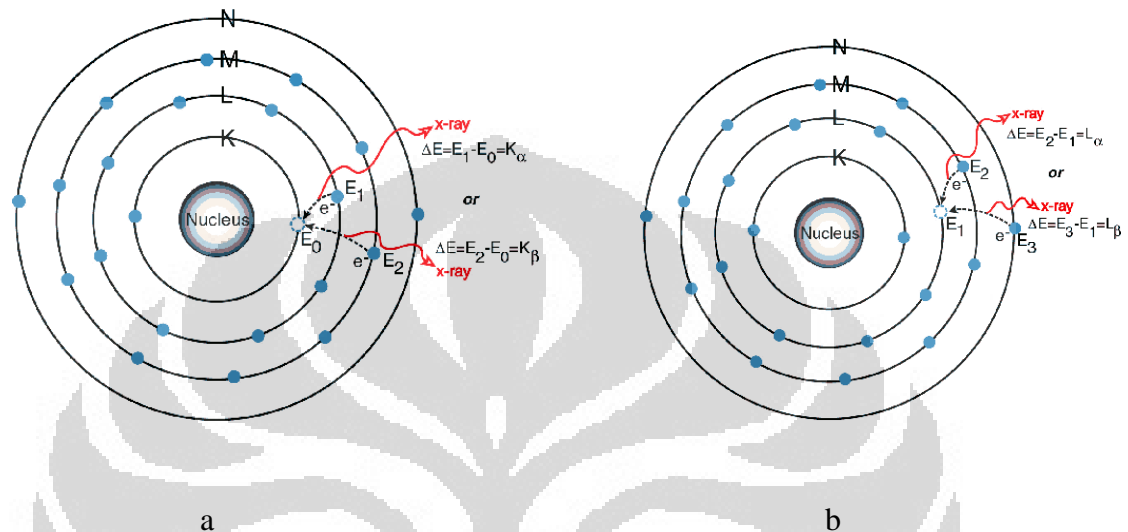
Dari persamaan awal ini maka untuk peristiwa Efek Compton selisih panjang gelombang yang terhambur dengan panjang gelombang foton yang datang

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Fluorisensi Berkas Sinar X

Ketika berkas primer Sinar X atau sumber radiasi lainnya mengenai sebuah atom sample, maka berkas tersebut dapat diserap oleh atom material atau dapat juga dihamburkan. Proses dimana energi berkas Sinar X di serap seluruhnya oleh elektron terdalam dari material disebut Efek Fotolistrik. Dari proses ini jika berkas primer Sinar X memiliki energi yang cukup maka elektron dapat keluar dari kulit terdalam, dan menghasilkan kekosongan (*hole*). Atom yang terdapat kekosongan ini akan mengalami ketidakstabilan. Untuk mengembalikan

kestabilan seperti awal, elektron dari kulit terluar selanjutnya mengisi kekosongan ini dan proses ini menghasilkan Sinar X yang memiliki energi sama dengan beda energi ikat dari dua kulit ini. Sinar X yang di hasilkan di sebut dengan Fluoresensi Sinar X (*X-Ray Fluorescence, XRF*) proses terbanyak terjadi di kulit K dan L dengan penampakan puncak-puncak spektrum yang berbeda intensitas<sup>9</sup>.



**Gambar 2.5** a. Proses Fluoresensi Sinar X kulit K, b. Proses Fluoresensi Sinar X kulit

## 2.3 Alat Ukur Radiasi

### 2.3.1 Detektor CdTe

Radiasi adalah salah satu mekanisme perambatan energi dari sumber radiasi ke lingkungannya tanpa memerlukan medium atau bahan pengantar tertentu. Radiasi memiliki dua sifat yang khas pertama tidak dapat dirasakan langsung oleh indra manusia kedua dapat menembus berbagai jenis bahan. Karena kedua sifat inilah ada atau tidaknya radiasi nuklir di perlukan suatu alat pembantu yang di sebut alat pengukur radiasi atau detektor.

Detektor CdTe merupakan detektor semikonduktor. Detektor ini mempunyai beberapa keunggulan yaitu lebih efisien dibandingkan dengan detektor isian gas, karena terbuat dari zat padat, serta mempunyai resolusi yang

lebih baik daripada detektor sintilasi. Bahan semikonduktor terbuat dari unsur golongan IV . Berikut akan di sediakan table perbandingan unsur-unsur penyusun detektor semikonduktor

**Table 2.1** Perbandingan material detektor CdTe dengan material Si dan Ge.

	CdTe	Si	Ge
Atomic number $Z$	48, 52	14	32
Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	6.02	2.33	5.32
Dielectric constant (relative)†	11	12	16
Intrinsic resistivity (300K) [ $\Omega\text{cm}$ ]	$> 2 \times 10^9$	$2.3 \times 10^5$	47
Energy gap (300K) [eV]	1.5	1.1	0.7
Average energy per electron-hole pair [eV]	4.43	3.61	2.98
Electron mobility (300K) [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	1000	1350	3900
Hole mobility (300K) [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	70	480	1900

### 2.3.2 Teori Operasi

Pada dasarnya, bahan isolator dan bahan semikonduktor tidak dapat meneruskan arus listrik. Hal ini di sebabkan semua elektronnya berada pada pita valensi sedangkan di pita konduksi kosong. Perbedaan tingkat energi antara pita valensi dan pita konduksi pada bahan isolator sangat besar sehingga tidak memungkinkan bagi elektron untuk keluar menuju pita konduksi. Sebaliknya pada semikonduktor perbedaan tingkat energi tersebut relatif lebih kecil, untuk detektor CdTe memiliki eneeergi sebesar 1.5 eV hal ini memungkinkan elektron untuk bisa keluar dari pita valensi menuju pita konduksi bila mendapat tambahan energi. Energi radiasi yang memasuki bahan semikonduktor akan di serap, sehingga beberapa elektron dari pita valensi menuju pita konduksi di antara ujung-ujung bahan semikonduktor terdapat beda potensial listrik, jadi terdapat perubahan energi, dari energi radiasi berubah menjadi energi listrik.

Untuk membentuk semikonduktor tipe P pada bahan tersebut disisipkan pengotor dari golongan III, sehingga bahan tersebut menjadi lebih bermuatan positif, karena terjadi kekosongan elektron pada struktur kristalnya. Bila



semikonduktor jenis N disinari cahaya, maka elektron yang tidak terikat pada struktur kristal akan mudah lepas. Kemudian bila dihubungkan semikonduktor jenis P dan jenis N dan kemudian disinari cahaya, maka akan terjadi beda tegangan diantara kedua bahan tersebut. Foto detektor PIN merupakan semikonduktor foto detektor yang paling umum. Foto detektor PIN merupakan sambungan dari PN. Pada keadaan normal, elektron bebas dan lubang (*Hole*) tidak dapat berpindah melewati sambungan (*junction*), sehingga tidak ada arus yang mengalir. Bila ada radiasi pengion yang memasuki lapisan kosong muatan ini maka akan terbentuk ion-ion baru, elektron dan *hole*, yang bergerak menuju kutub positif dan kutub negatif. Tambahan elektron dan *hole* inilah yang akan menyebabkan terbentuknya pulsa atau arus listrik. Untuk detektor CdTe energi yang di butuhkan untuk menciptakan ion atau pasangan elektron dan hole di butuhkan energi sebesar  $4.43 \text{ eV}^9$ .

#### **2.4 Penentuan Spektrum Energi Menggunakan Xcomp5r**

Program Xcomp5r merupakan pemrograman yang digunakan untuk mendapatkan spektrum Sinar X hasil pendekatan empiris<sup>1</sup>. Xcomp5r berbasis pengoperasian DOS. Xcomp5r dapat menentukan spektrum energi Sinar x dalam rentang antara tegangan tabung 20 kV-150 kV dengan interval  $1 \text{ keV}^4$ . Dalam program Xcomp5r ini dapat di-set jarak spektrum yang digunakan dan absorber yang digunakan tersedia absorber berupa Aluminium, tembaga dsb. Program Xcomp5r di gunakan sebagai sumber Sinar X pada program EGSnrc dan di gunakan sebagai data pembanding hasil simulasi Monte Carlo.

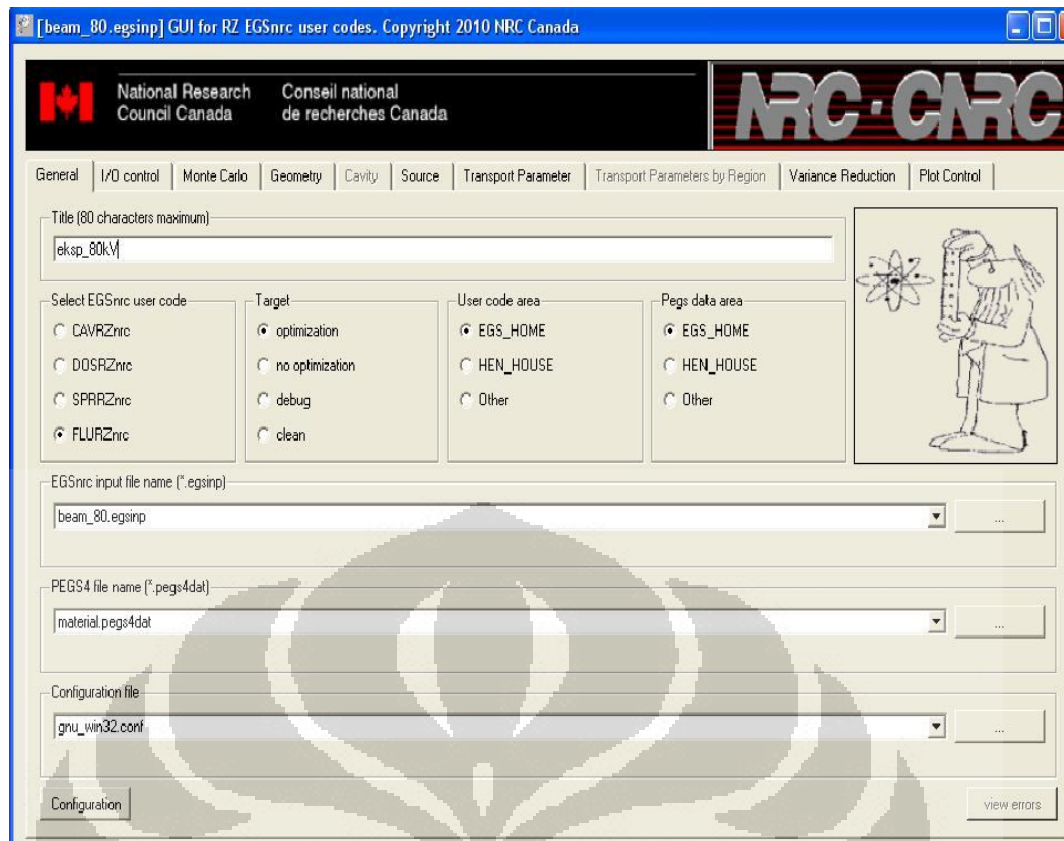
#### **2.5 Simulasi Metode Monte Carlo Menggunakan EGSnrc**

Metode Monte Carlo adalah sebuah bahasa pemrograman yaitu Algoritma Monte Carlo yang mensimulasikan berbagai perilaku sistem Fisika dan Matematika. Algoritma Monte Carlo adalah metode Monte Carlo yang digunakan untuk menentukan solusi problem matematis (yang terdiri dari banyak variabel) yang sulit dipecahkan. Penggunaan metode ini untuk mengevaluasi integral def init terutama integral multidimensi dengan syarat dan batasan yang rumit<sup>3</sup>.

Penggunaan Metode Monte Carlo di Fisika sangat membantu sekali. Dalam penelitian ini Metode Monte Carlo di gunakan untuk menentukan besaran energi dan total fluks. Dengan cara ini kita dapat mengetahui proses-proses yang terjadi dalam suatu simulasi misalnya keadaan partikel yang melewati geometri, energi partikel yang berinteraksi. Partikel-partikel yang berinteraksi dalam metode ini adalah partikel-partikel real, artinya partikel tersebut masih diketahui keberadaannya dalaam simulasi dan partikel yang memiliki energi diatas energi Cut-off. Penggunaan jumlah partikel yang akan disimulasi akan menentukan keakuratan data dan menentukan lamanya simulasi berlangsung. Semakin banyak partikel yang digunakan semakin kompleks interaksi yang terjadi selama simulasi.

EGSnrc merupakan program yang menggunakan Logika Monte Carlo. Dalam menjalankan program EGSnrc, terlebih dahulu ada beberapa pendefinisian mengenai simulasi yang akan dijalankan. diantaranya yaitu pendefinisian Geometri target yang digunakan. Dalam penelitian ini material detektor CdTe di simulasikan sebagai bentuk tabung berjari-jari 3 mm, bukan dalam bentuk sebenarnya yaitu persegi berukuran 3 mm x 3 mm hal ini disebabkan karena EGSnrc tidak mengenal bentuk geometri persegi. Kemudian pendefinisian material dapat dibuat pada EGSgui. Selain hal di atas perlu juga pendefinisian bentuk sumber yang akan digunakan. Terdapat sumber berupa titik yang di gunakan dalam penelitian ini.

Sumber Sinar X (input) yang digunakan dalam penelitian ini adalah output Spektrum Sinar X yang di hasilkan dari simaulasi Xcomp5r. *output* dari simulasi Xcomp5r ditulis kembali dengan cara-cara tertentu sehingga program EGS dapat membaca input hasil dari simulasi Xcomp5r.



Gambar 2.6 Tampilan Software EGSnrc

## BAB 3

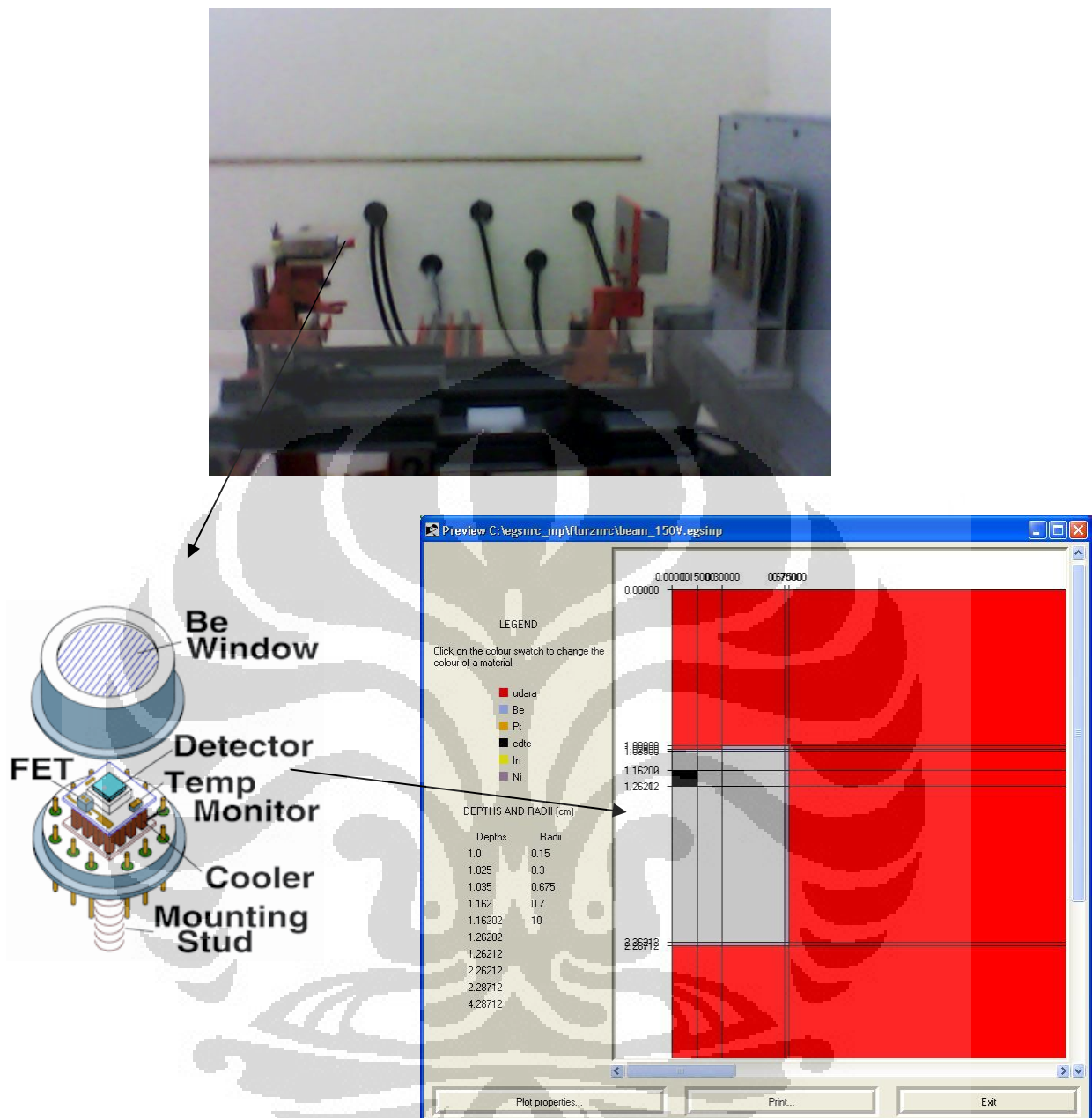
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Pemodelan Detektor CdTe

Pengambilan data secara simulasi dilakukan menggunakan EGSnrc<sup>5,6,7</sup>. Langkah pengambilan data ini diawali dengan pemodelan detektor CdTe (Gambar 3.1). Berikutnya pembuatan bahan material yang didefinisikan pada EGSgui. Semua bahan material yang digunakan dalam simulasi sudah disediakan di bagian tersebut (Tabel 3.1)

Dengan mendefinisikan berbagai parameter, di antaranya adalah ECUT dan PCUT. Kedua parameter ini memegang peranan penting dalam mensimulasikan partikel berenergi rendah. ECUT merupakan batas terendah energi yang akan menghentikan elektron-elektron jika memiliki energi di bawah energi *Cut-off* selama proses simulasi transport berlangsung. Sedangkan PCUT adalah batas terendah energi yang akan menghentikan simulasi foton jika foton yang datang berenergi di bawah *Cut-off*<sup>6</sup>.

Bentuk geometri yang sesuai dengan eksperimen menentukan keakuratan data yang didapat. Geometri tabung Sinar X tidak dimodelkan. Perlu diketahui bahwa dalam simulasi ini material detektor yang digunakan dalam eksperimen berbentuk kotak dianggap berbentuk lingkaran dalam proses simulasi.



Gambar 3.1 Model Geometri Detektor XR-100 T CdTe

**Table 3.1** Parameter Fisik dalam simulasi EGSnrcMP metode Monte Carlo

Material	Elemen penyusun	% berat	Massa jenis (gr/cm <sup>3</sup> )
Udara kering	C	0.0124	1.205E-3
	N	75.5267	
	O	23.1787	
	Ar	1.2827	
CdTe	Cd	0.025056	5.85
	Te	0.027144	
Pt	-	-	21.45
Be	-	-	1.848
In	-	-	7.31
Ni	-	-	8.902

### 3.2. Metode Simulasi

Penelitian ini terfokus pada pengambilan data spektrum energi secara simulasi. Dengan menggunakan gabungan dua buah software kemudian didapatkan spektrum energi Sinar X pada beberapa tegangan tabung.

#### 3.2.1 Penentuan spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Xcomp5r

Menggunakan simulasi Xcomp5r diawali dengan mendefinisikan tegangan yang dipakai. Xcomp5r hanya mampu mensimulasikan antara tegangan 20 kV – 150 kV. Kemudian absorber yang digunakan, Xcomp5r menyediakan beberapa absorber diantaranya aluminium yang digunakan dalam penelitian ini. Ketebalan absorber yang digunakan disediakan antara 0 mm - 300 mm. dengan memasukkan ketebalan absorber (*Added filter*) sesuai dengan table 3.1 kemudian

mengatur jarak spektrum yang di ukur dalam satuan meter, spektrum Sinar X pada berbagai tegangan dapat diperoleh.

**Tabel 3.2** Perolehan filter tambahan pada kualitas radiasi RQR\*

<b>Kualitas Radiasi</b>	<b>Tegangan tabung sinar-x (kV)</b>	<b>HVL (mmAl)</b>	<b>Filter Tambahan (mmAl)</b>
RQR 2	40	1.42	2.69
RQR 3	50	1.78	2.52
RQR 4	60	2.19	2.94
<b>RQR 5</b>	<b>70</b>	<b>2.58</b>	<b>2.83</b>
RQR 6	80	3.01	3.1
RQR 7	90	3.48	3.31
RQR 8	100	3.97	3.35
RQR 9	120	5	3.8
RQR 10	150	6.57	4.26

\*Ainur Rahmi : Analisis Ketergantungan Detektor Radiodiagnostik Terhadap Kualitas Radiasi RQR Menggunakan Protokol IAEA TRS No. 457

### 3.2.2 Pengambilan Data Spektrum Energi Sinar X Melalui Simulasi Monte Carlo Menggunakan EGSnrc

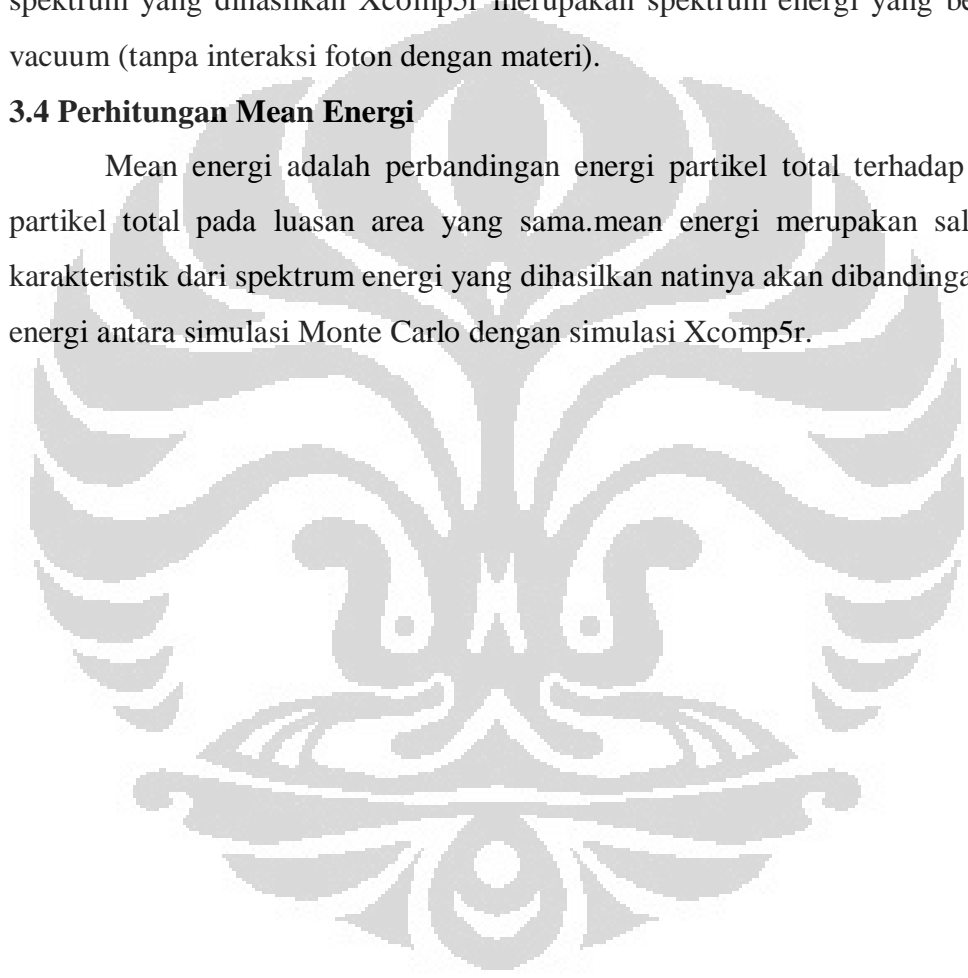
Simulasi EGSnrc memiliki empat buah *user code*. Dalam penelitian ini di gunakan FLURZnrc yang berfungsi menghasilkan fluks energi atau spektrum energi<sup>5</sup>. Setelah mendefinisikan geometri detektor (diatas) maka langkah selanjutnya adalah mendefinisikan *Source* yang berisikan di antaranya sumber Sinar X yang di gunakan. Maka hasil dari simulasi Xcomp5r di masukkan pada bagian ini. Parameter lain yang penting untuk diketahui adalah Transport Parameter yang berisikan karakter-karakter foton yang disimulasikan, di antaranya adalah energi *Cut-off* foton dan elektron dan interaksi-interaksi yang terjadi selama simulasi.

### 3.3 Verifikasi Spektrum Energi Hasil Simulasi

Verifikasi dibutuhkan dalam penelitian ini yang berfungsi untuk mengecek apakah simulasi yang dijalankan sesuai dengan yang diharapkan. Dalam verifikasi ini akan dibandingkan Spektrum energi yang didapat dari simulasi Xcomp5r dengan spektrum pada bagian vacuum hasil simulasi Monte Carlo. Dipilih daerah *vacuum* untuk dengan pertimbangan interaksi foton yang terjadi pada simulasi Xcomp5r sama dengan daerah vacuum pada detektor CdTe. Karena spektrum yang dihasilkan Xcomp5r merupakan spektrum energi yang berada di vacuum (tanpa interaksi foton dengan materi).

### 3.4 Perhitungan Mean Energi

Mean energi adalah perbandingan energi partikel total terhadap jumlah partikel total pada luasan area yang sama. mean energi merupakan salah satu karakteristik dari spektrum energi yang dihasilkan nantinya akan dibandingkan mean energi antara simulasi Monte Carlo dengan simulasi Xcomp5r.



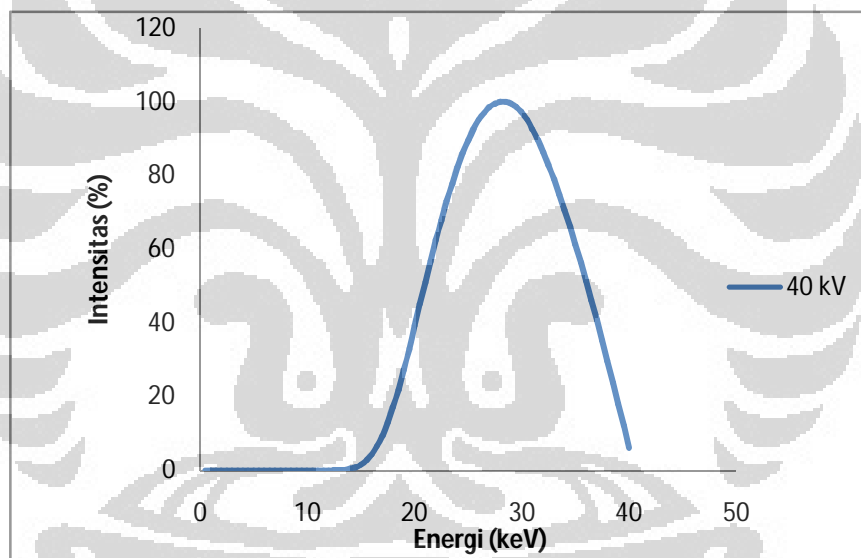


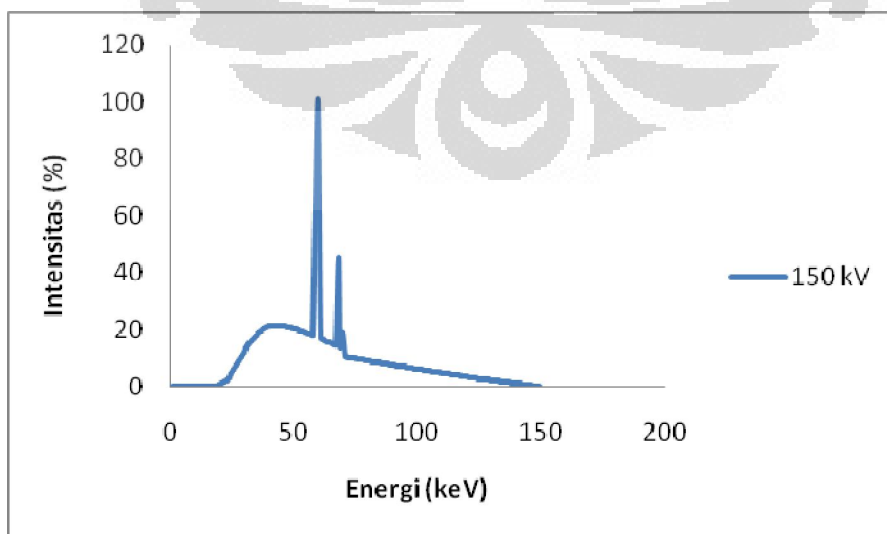
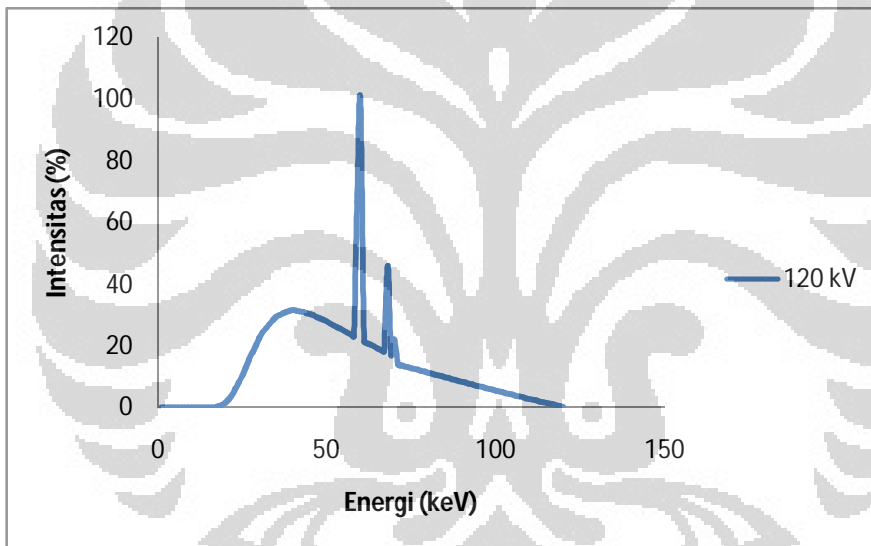
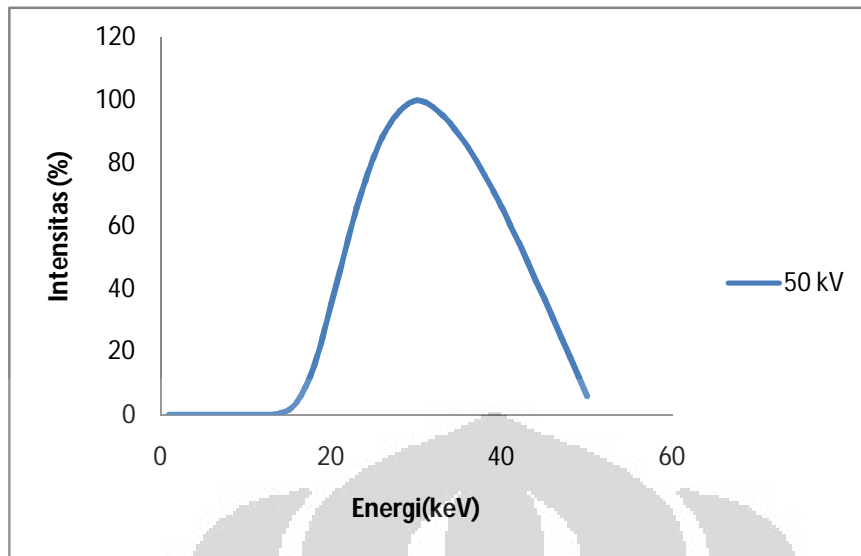
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Xcomp5r

Simulasi yang dijalankan pada program Xcomp5r ini berada pada kondisi yang sangat ideal, kemudian spektrum yang di hasilkan diukur pada jarak 100 cm tanpa detektor, artinya spektrum yang di hasilkan diukur tanpa adanya inteaksi dengan materi. *Output* yang dihasilkan dari program Xcomp5r ini di antaranya adalah spektrum energi di ruang hampa, besar HVL, besar Kerma dan energi rata-rata. Spektrum energi yang dihasilkan simulasi Xcomp5r disediakan di bawah ini.





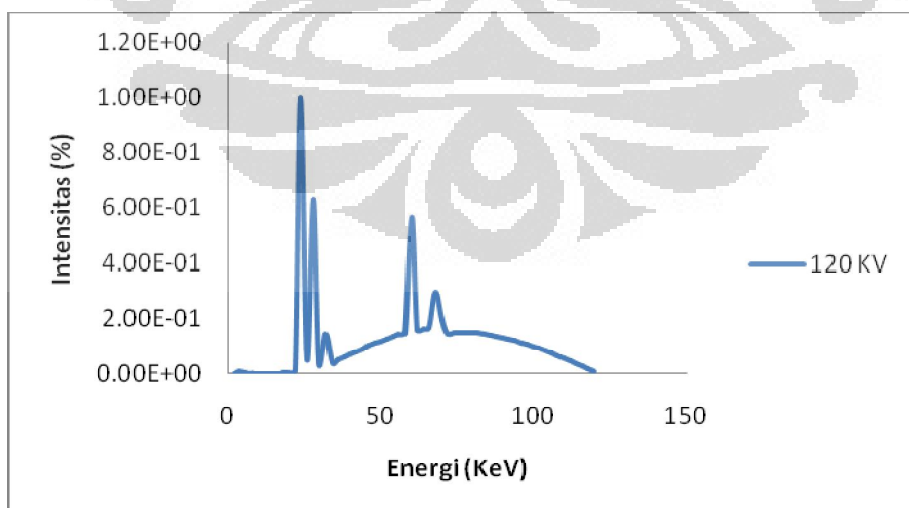
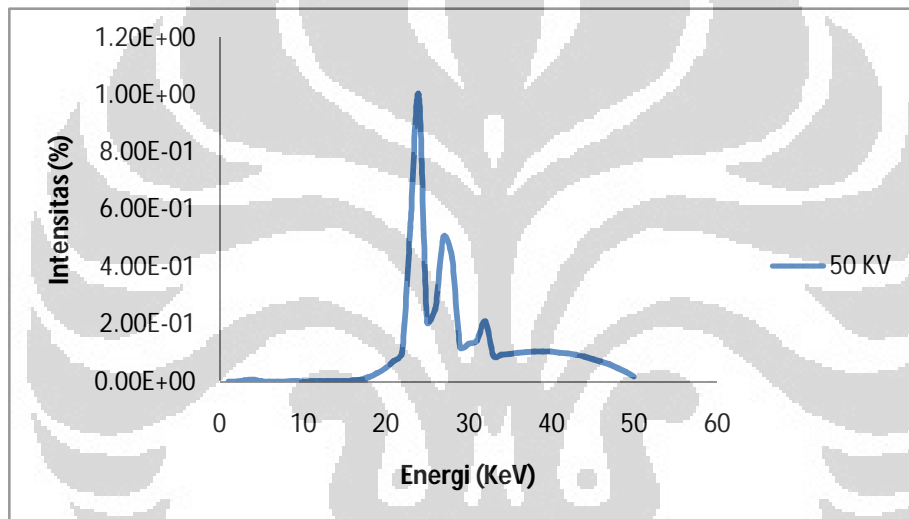
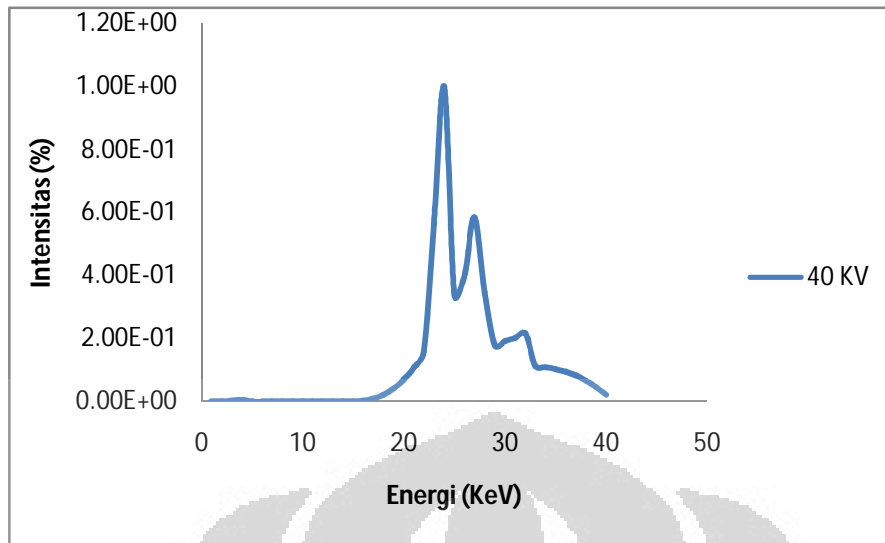
Universitas Indonesia

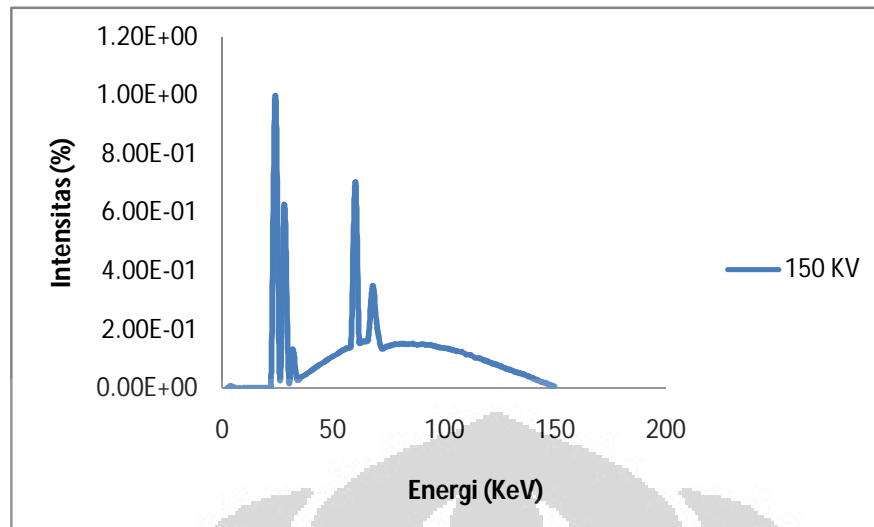
**Gambar 4.1** Spektrum energi hasil simulasi Xcomp5r pada beberapa tegangan tabung

Spektrum yang dihasilkan dari simulasi Xcomp5r terlihat begitu halus dimulai dari tegangan 40 kV, pada dasarnya jika tabung Sinar X diberi suatu potensial maka akan keluar foton dengan besar energi kinetik sesuai dengan potensial yang diberikan. Terlihat pada tegangan 40 kV puncak energi kinetik foton yang terjadi tepat sama dengan 40 keV dengan menganggap tidak ada interaksi foton dengan materi lainnya. Begitu juga dengan nilai potensial lainnya akan menunjukkan puncak energi yang di hasilkan tepat sama dengan potensial tabung yang beri. Fenomena lain terjadi pada potensial 80 kV samapai 150 kV terdapat dua puncak sinar X karakteristik dari target sinar X yaitu tungsten dengan energi sebesar 59.321 keV dan 67.716 keV. Sinar X karakteristik di hasilkan dari peristiwa tereksitasinya elektron dalam di dalam atom target. Di karenakan Xcomp5r hanya memiliki ketelitian 1 keV maka dapat disimpulkan Sinar tersebut adalah Sinar X karakteristik  $K\alpha$  dan  $K\beta$ . Perlu diketahui bahwa Program Xcomp5r berdasarkan sejumlah percobaan kemudian dari hasil percobaan tersebut dibuat sebuah formulasi atau rumus sehingga setiap data yang dimasukkan ke dalam program Xcomp5r dapat membentuk spektrum sesuai dengan tegangan tabung yang digunakan. Itulah sebabnya program Xcomp5r disebut juga sebagai pendekatan empiris.

**4.2 Hasil Pengukuran Spektrum Energi Sinar X Menggunakan Simulasi Monte Carlo**

Simulasi Monte Carlo dilakukan pada jarak antara sinar X dengan detektor 100 cm dengan sumber Sinar X berasal dari satu titik dan pada detektor Sinar X memiliki jari-jari sebesar 0.005 cm dengan sedikitnya 50 juta foton yang disimulasikan. Dengan menset energi *cut-off* untuk foton sebesar 1 keV dan elektron sebesar 0.521 MeV artinya jika ada foton berenergi di bawah 1 keV maka foton itu tidak diikutsertakan dalam simulasi begitu juga untuk elektron. Berikut akan disajikan spektrum yang dihasilkan material CdTe.





**Gambar 4.2** Spektrum energi Pada CdTe hasil simulasi pada beberapa tegangan tabung

Dari gambar di atas, fenomena yang menjadi ciri khas yang tidak ditemukan dalam penggunaan detektor semikonduktor lainnya seperti Si dan Ge adalah adanya jebakan muatan (*charge trapping*) yang memiliki pengaruh besar dalam penggunaan detektor CdTe.

Semua alat pendeteksi radiasi bekerja berdasarkan terjadinya ionisasi radiasi. Dari ionisasi radiasi ini akan menghasilkan elektron bebas dan lubang (*Hole*) di medium tempat radiasi itu berinteraksi. Muatan yang dihasilkan akan sebanding dengan energi yang diterima material. Ketika sejumlah energi disimpan pada material detektor sebesar  $E_0$  maka akan tercipta  $N_0 = E_0 / e_{\text{pair}}$ . Dalam detektor semikonduktor energi pasangan elektron dan *hole* sekitar tiga sampai empat kalinya *Bandgap*. Dalam sebuah medan listrik yang besar elektron dan *hole* akan bergerak pada arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menuju kutub positif (anoda) dan *hole* akan bergerak menuju kutub negatif (Katoda). Untuk detektor CdTe Misalnya XR 100-T CdTe, elektroda positif adalah Indium dengan ketebalan sebesar  $1 \mu\text{m}$  dan elektroda negatif adalah Platina yang memiliki ketebalan  $0,2 \mu\text{m}^9$ . Dengan adanya aliran elektron menuju anoda berarti menimbulkan arus listrik

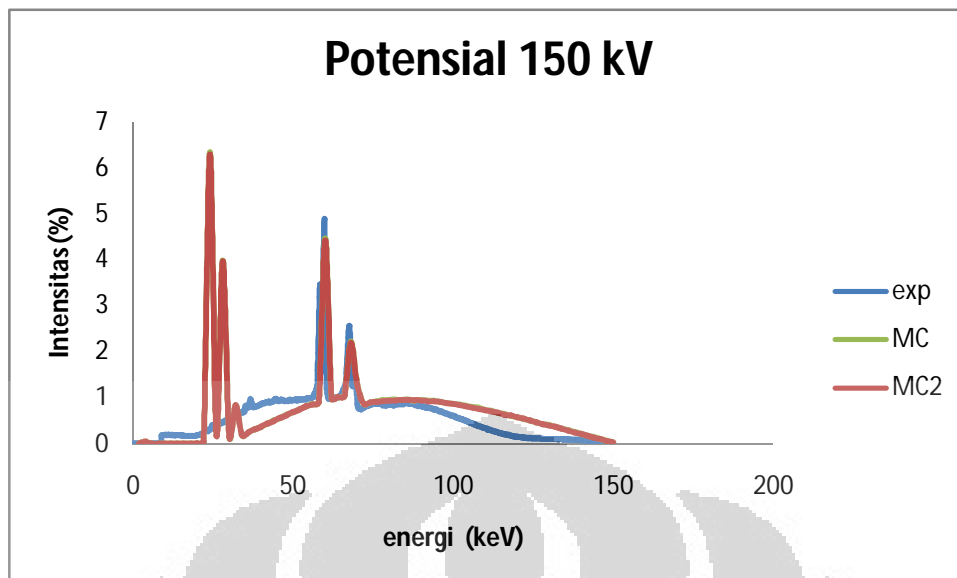
Idealnya sebuah detektor, setiap radiasi Sinar X atau Sinar Gamma yang datang kemudian berinteraksi dengan material detektor menghasilkan pulsa listrik yang sama besarnya. Untuk radiasi monoenergi maka akan tampak hanya satu puncak spektrum dan laju radiasi akan sama dengan laju foton yang datang. Akan tetapi detektor, sesungguhnya tidak bekerja demikian dalam prakteknya ternyata ada beberapa foton yang tidak berinteraksi semua, hanya melewati material detektor saja. Beberapa foton yang berinteraksi akan dihamburkan dari detektor atau menghasilkan radiasi sekunder dalam detektor, kemudian hanya beberapa energi saja yang di simpan dalam detektor dari seluruh jumlah energi foton yang datang. Dengan alasan diatas, maka akan terjadi penyimpangan spektrum yang terukur dengan spektrum hasil teoritik.

Pada ketebalan material detektor sebesar 1 mm, detektor ini memiliki sensitifitas yang tinggi sampai 100 keV. Dengan efisiensi puncak spektrum 90 % sampai energi 65 keV (dapat di lihat pada kurva efisiensi). Berbeda dengan detektor Si yang memiliki efisiensi menurun pada energi 20 keV. Tetapi fungsi respon detektor CdTe berbeda dengan respon detektor Si atau Ge. Dengan adanya perbedaan fungsi respon detektor ini mengakibatkan perbedaan spektrum secara kuantitatif.

Cd dan Te memiliki Sinar X Fluoresensi kulit K pada energi 26,704 untuk Cd dan 31.80 keV untuk Te (table 4.1). Foton yang datang di atas energi tersebut mengalami interaksi Foto listrik. Ada elektron pada kulit K yang keluar dan elektron pada kulit selanjutnya bertransisi ke kulit K sambil mengemisikan Sinar X Fluoresensi tampak pada gambar 4.3 (potensial lainnya dapat dilihat pada Lampiran 1).

**Table 4.1** Nilai energi Fluorisensi Sinar X kulit K atom Cd dan Te

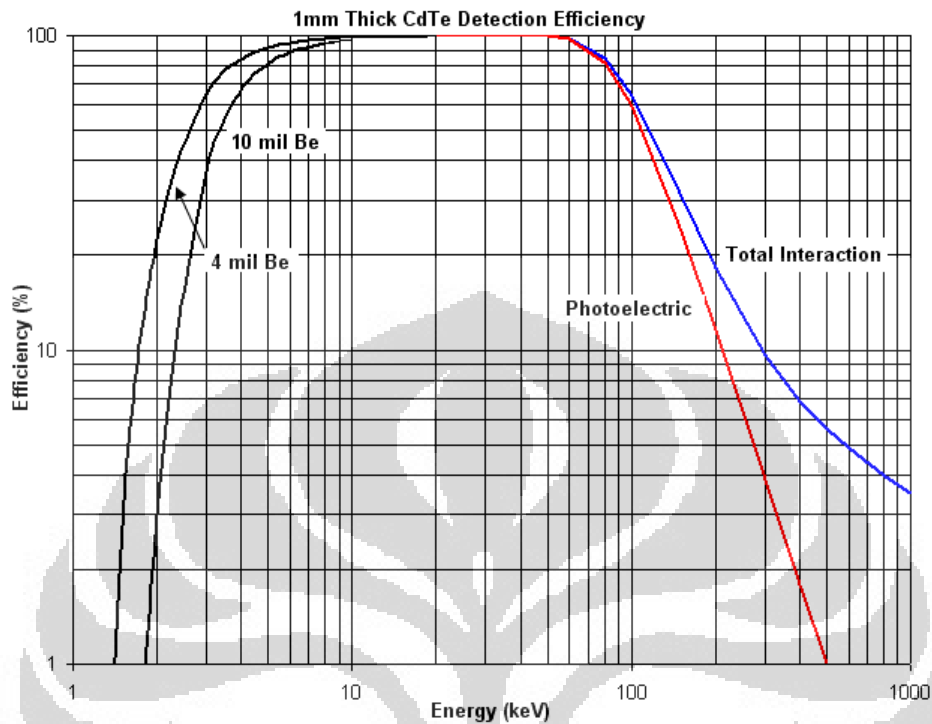
Element	K edge	Ka1	Ka2	Kb1	Kb2
Cd	26.704	22.982	23.172	26.093	26.641
Te	31.800	27.200	27.471	30.993	31.698



**Gambar 4.3** spektrum gabungan antara percobaan (exp), detektor CdTe (MC), hanya material CdTe (MC2)

Dari data table dan gambar spektrum di atas, satu foton yang datang dan memiliki energi yang lebih besar dari 26.704 keV atau 31.8 keV akan menghasilkan empat energi yang lebih rendah dari energi yang datang. Pada tegangan tabung rendah seperti 40 kV sampai 80 kV, terlihat ada beberapa energi sinar X fluoresensi kulit K di antaranya, pada tegangan 40 kV terdapat dua puncak yang memiliki energi sekitar 24 keV dan 28 keV puncak tersebut merupakan sinar X fluoresensi dari atom Cd dan Te. Sinar X ini lebih terlihat bila dibanding dengan hasil pengukuran (dapat di lihat pada lampiran 2)

Hal ini terlihat karena energi foton memiliki probabilitas interaksi sampai 80 %. Sedang pada tegangan tabung lebih dari 80 kV fluoresensi Sinar X tidak terlihat. Hal ini disebabkan energi foton pada tegangan tabung tersebut probabilitas interaksi foto listrik berkurang dan untuk spektrum hasil simulasi MC tidak cukup terlihat karena ketelitian simulasi ini sampai 1 keV sehingga tidak mampu untuk membedakan Sinar X fluoresensi lainnya yang berdekatan dan sulit menganalisisnya secara pasti. Untuk tegangan tabung sebesar 90 probabilitas interaksi foto listrik sebesar 70 %, sampai energi 150 keV probabilitas interaksi foto listrik sebesar 25 %.



**Gambar 4.4** Grafik efisiensi detektor XR 100 T CdTe

Selain fluoresensi Sinar X kulit K, untuk tegangan tabung lebih besar dari sama dengan 80 kV terdapat pula Sinar X karakteristik target Tungsten (table 4.2).

**Tabel 4.2** Sinar X Karakteristik kulit K target Tungsten (dalam keV)

Transisi	Referensi	Tegangan Tabung				
		80 kV	90 kV	100 kv	120 kV	150 kV
K-L3 ( $\alpha_1$ )	59.321	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
K-M3 ( $\beta_1$ )	67.654	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0



### **4.3 Verifikasi Spektrum simulasi Monte Carlo dengan Spektrum Simulasi Xcomp5r**

Pada bagian ini akan dibahas beberapa verifikasi yang berguna untuk memastikan bahwa program yang dijalankan sesuai dengan aturan di antaranya adalah melihat energi rata-rata foton pada tiap-tiap tegangan tabung dan perbandingan spektrum udara pada bagian depan detektor CdTe yang didapatkan dari simulasi Monte carlo dengan hasil simulasi Xcomp5r.

#### **4.3 .1 Perhitungan Energi Rata-rata**

Sinar X ditimbulkan jika elektron cepat menumbuk materi. Bertambah cepat elektron semula, bertambah hebat kemampuan tembus Sinar X, dan bertambah banyak jumlah elektron, bertambah besar pula intensitas berkas Sinar X yang di hasilkan. Bertambah kemampuan tembus sebuah Sinar X di tentukan besar energi yang dihasilkan. Energi rata-rata merupakan perbandingan energi total partikel terhadap jumlah total partikel pada luasan area yang sama. Pada tabel 4.1 menunjukkan energi rata-rata hasil simulasi dengan simulasi Xcomp5r.

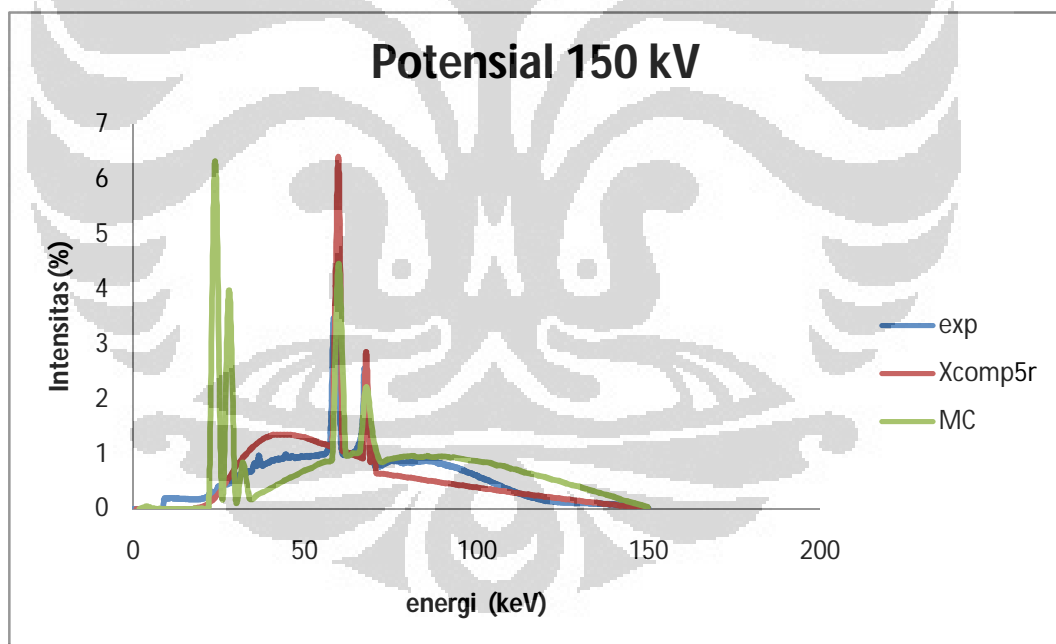
**Table 4.3** Perhitungan energi rata-rata (dalam keV)

Potensial tabung	Xcomp5r	Percobaan	MC
40 kV	28.2	27.9	26.3
50 kV	32.1	31.4	29.1
60 kV	36.0	35.7	33.2
70 kV	39.6	39.3	37.2
80 kV	43.4	43.5	42.3
90 kV	46.9	46.9	47.01
100 kV	50.2	49.9	51.1
120 kV	55.8	56.4	59.1
150 kV	63.4	67.1	69.8

**Table 4.4** Perhitungan simpangan relatif (%)

Potensial (kV)	Xcomp5r (keV)	Percobaan (keV)	simulasi (keV)	Rata-rata (keV)	Simpangan Relatif		
					Xcomp5r	Percobaan	Simulasi
40	28,2	27,9	26,3	27,47	2,67%	1,58%	4,25%
50	32,1	31,4	29,1	30,87	4,00%	1,73%	5,72%
60	36	35,7	33,2	34,97	2,96%	2,10%	5,05%
70	39,6	39,3	37,2	38,70	2,33%	1,55%	3,88%
80	43,4	43,5	42,3	43,07	0,77%	1,01%	1,78%
90	46,9	46,9	47,0	46,94	0,08%	0,08%	0,16%
100	50,2	49,9	51,1	50,40	0,40%	0,99%	1,39%
120	55,8	56,4	59,1	57,10	2,28%	1,23%	3,50%
150	63,4	67,1	69,8	66,77	5,04%	0,50%	4,54%

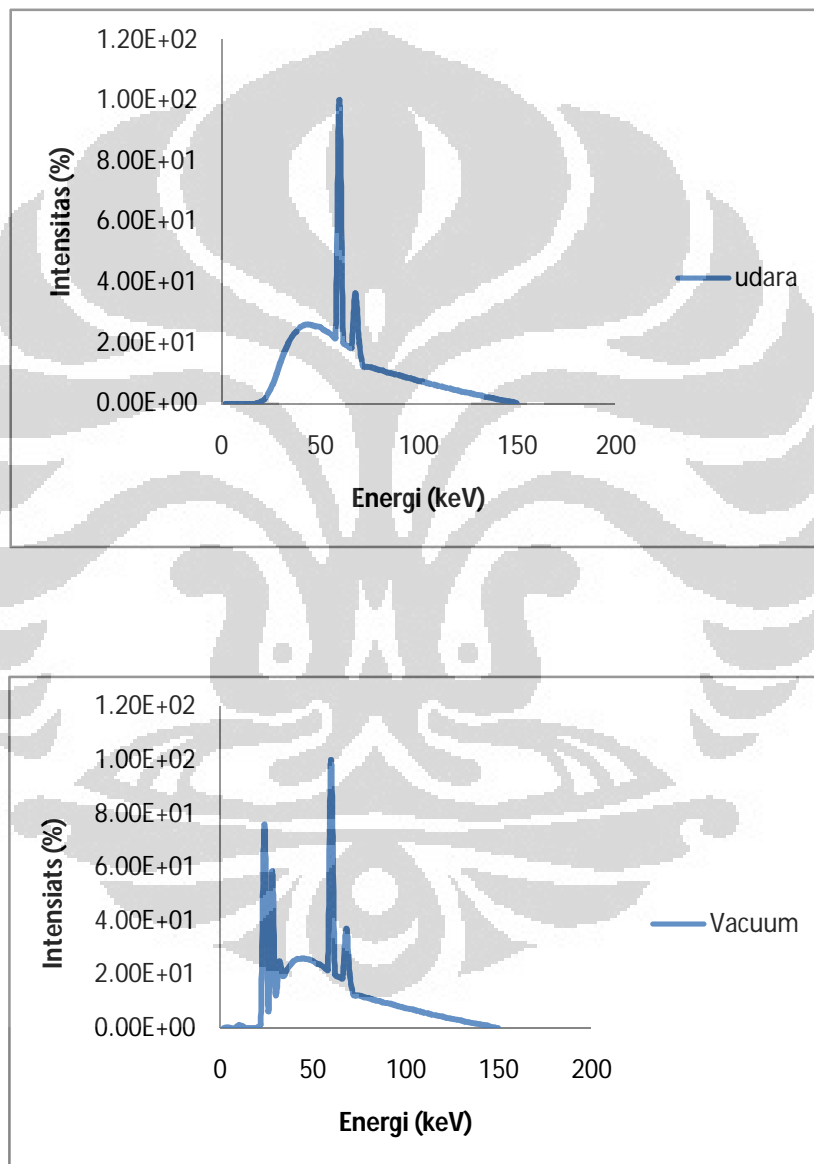
Dari data pada table 4.4 terlihat bahwa untuk tegangan tabung di bawah 90 kV energi rata-rata yang didapatkan melalui simulasi MC memiliki energi paling rendah di antara hasil Xcomp5r dan percobaan. Hal ini karena interaksi foton dengan materi CdTe lebih kuat dibanding dengan interaksi yang berada pada percobaan asli sedangkan untuk Xcomp5r tidak ada interaksi foton dengan materi CdTe. Untuk tegangan 90 kV terlihat bahwa energi rata-rata hasil simulasi terlihat lebih besar dan memiliki simpangan relatif sebesar 0.16%. besarnya nilai energi rata-rata spektrum hasil simulasi diakibatkan tidak adanya pelemahan efisiensi CdTe sedangkan pada percobaan (berdasarkan kurva efisiensi) terdapat pelemahan di atas 90 kV sampai tegangan 150 kV. Pada energi 90 keV harga efisiensi berkisar 73 % sampai energi 150 keV berharga 30 %. Jika ketiga spektrum di satukan dengan acuan energi rata-rata Xcomp5r maka akan di dapat gambar 4.3 dan untuk potensial tabung lainnya dapat di lihat pada lampiran 3

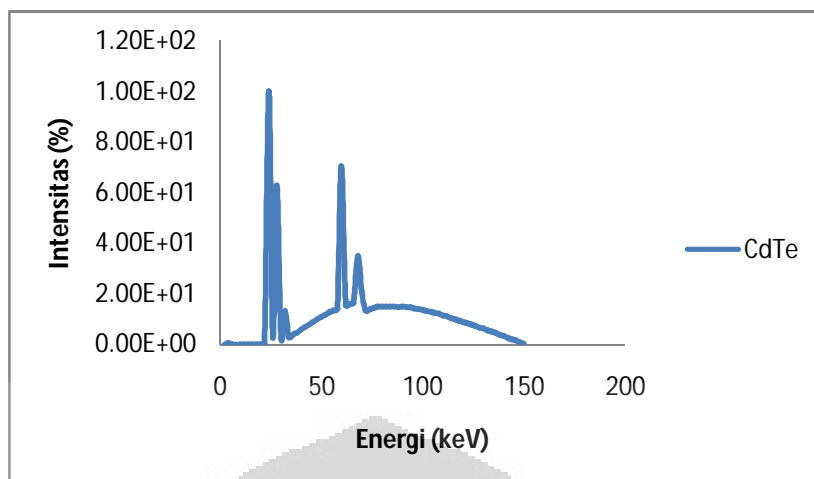


**Gambar 4.5** Spektrum gabungan dinormalisasi berdasarkan energi rata-rata.

#### 4.3.2 Pola Perubahan Spektrum Detektor CdTe Simulasi Monte Carlo.

Selanjutnya akan disajikan beberapa perubahan perubahan bentuk spektrum mulai dari spektrum di udara sampai sampai spektrum pada CdTe. Di sini akan di tampilkan hanya pada tegangan tabung 150 kV selebihnya dapat di lihat pada lampiran 4





**Gambar 4.6** Perubahan spektrum energi pada simulasi Monte Carlo.

Pada tegangan tabung 150 kV terlihat spektrum yang di hasilkan pada simulasi Monte Carlo tampak seperti gambar 4.5. terlihat bahwa pada daerah udara spektrum yang di hasilkan sama dengan spektrum Xcomp5r pada tegangan yang sama, dengan kata lain simulasi ini berjalan dengan baik. Perubahan terjadi ketika radiasi memasuki ruang hampa yang sebelumnya melewati Be setebal 100  $\mu\text{m}$ . Tampak ada dua puncak yang terlihat hal ini di sebabkan pantulan radiasi yang mengenai material CdTe secara terus menerus selama simulasi berlangsung, sedangkan spektrum yang terjadi pada material CdTe merupakan interaksi radiasi dengan atom Cd dan Te sehingga menghasilkan Sinar karakteristik Cd dan Te yang sudah di bahas sebelumnya.

Hal yang berbeda ketika di dibandingkan dengan spektrum hasil lainnya. Hasil pengukuran tidak menunjukkan Sinar X karakteristik Cd dan Te tidak terlihat secara jelas pada energi rendah hal ini di sebabkan energi rendah berasal dari sinyal yang kecil, sinyal yang kecil ini di hilangkan oleh spektroskopi detektor CdTe sedangkan dalam simulasi Monte Carlo semua peristiwa yang terjadi selama simulasi semuanya di tampilkan selama masih dalam cakupan parameter yang telah di definisikan.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Program Xcomp5r dapat digunakan sebagai sumber Sinar X (radiasi) pada simulasi EGSnrc.
2. Spektrum energi dari simulasi Monte Carlo menunjukkan interaksi radiasi dengan atom Cd dan Te terlihat jelas dengan adanya fluoresensi Sinar X dari atom Cd dan Te.
3. Berdasarkan data energi rata-rata, pada energi di atas 100 keV spektrum hasil simulasi menunjukkan energi rata-rata lebih besar dibandingkan spektrum hasil pengukuran. Disebabkan pada pengukuran terdapat pelemahan efisiensi di atas 100 keV.
4. Spektrum energi yang didapat merupakan spektrum karakteristik CdTe, hal ini terbukti spektrum yang dihasilkan dengan Be dan In sama dengan spektrum yang dihasilkan CdTe murni (tanpa Be dan In)

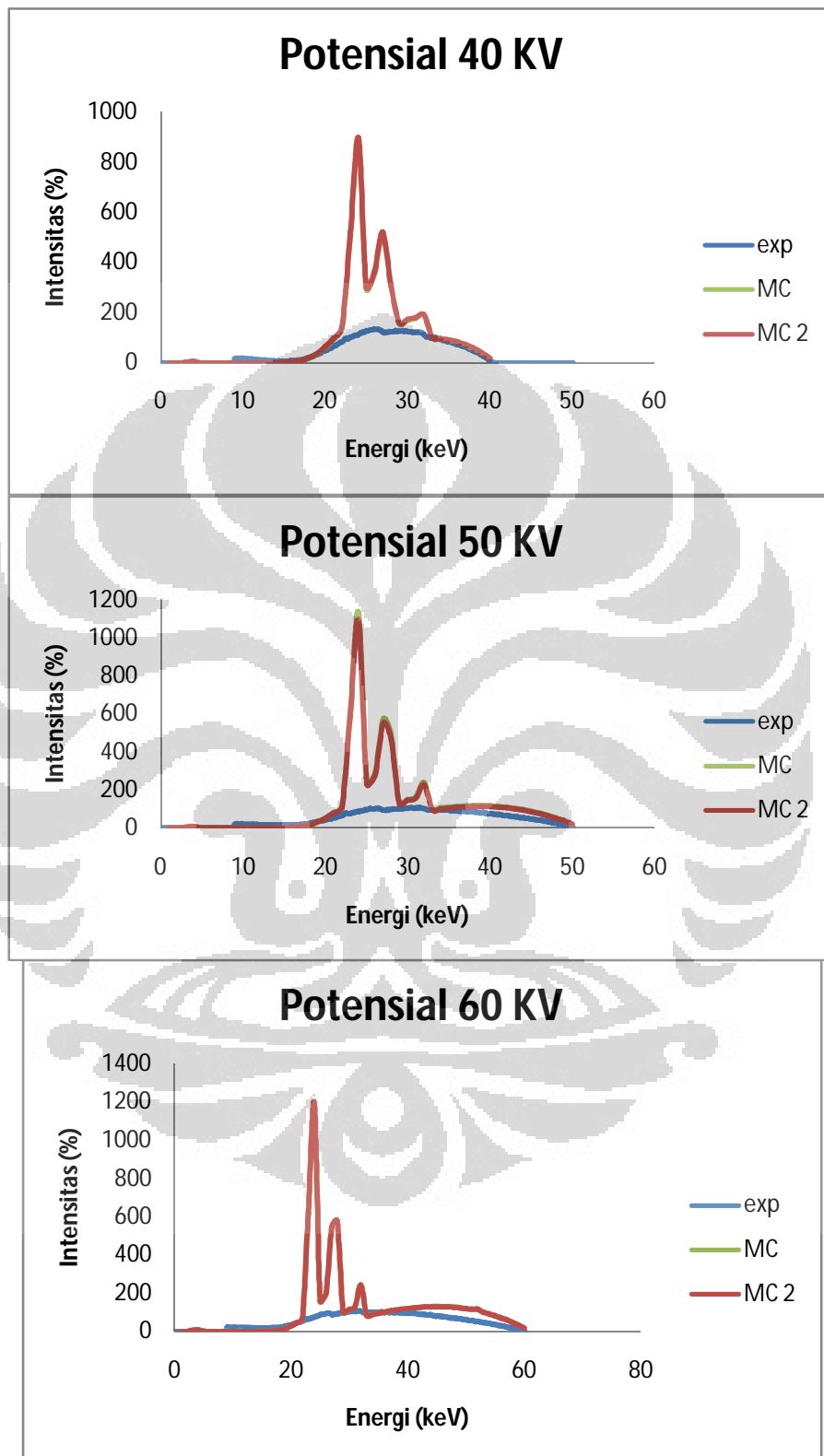
#### 5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya di sarankan pemodelan detektor agar lebih disempurnakan mengingat akan banyak terjadi interaksi. Dengan model yang sempurna akan di dapatkan data simulasi yang lebih real.
2. Diperlukan adanya sebuah data pembanding yang lebih baik untuk spektrum CdTe, sehingga dapat di ketahui tingkat keberhasilan simulasi yang di lakukan.
3. Mencoba mencari spektrum energi Sinar X pada CdTe menggunakan *Software* lain semisal BEAMnrc.

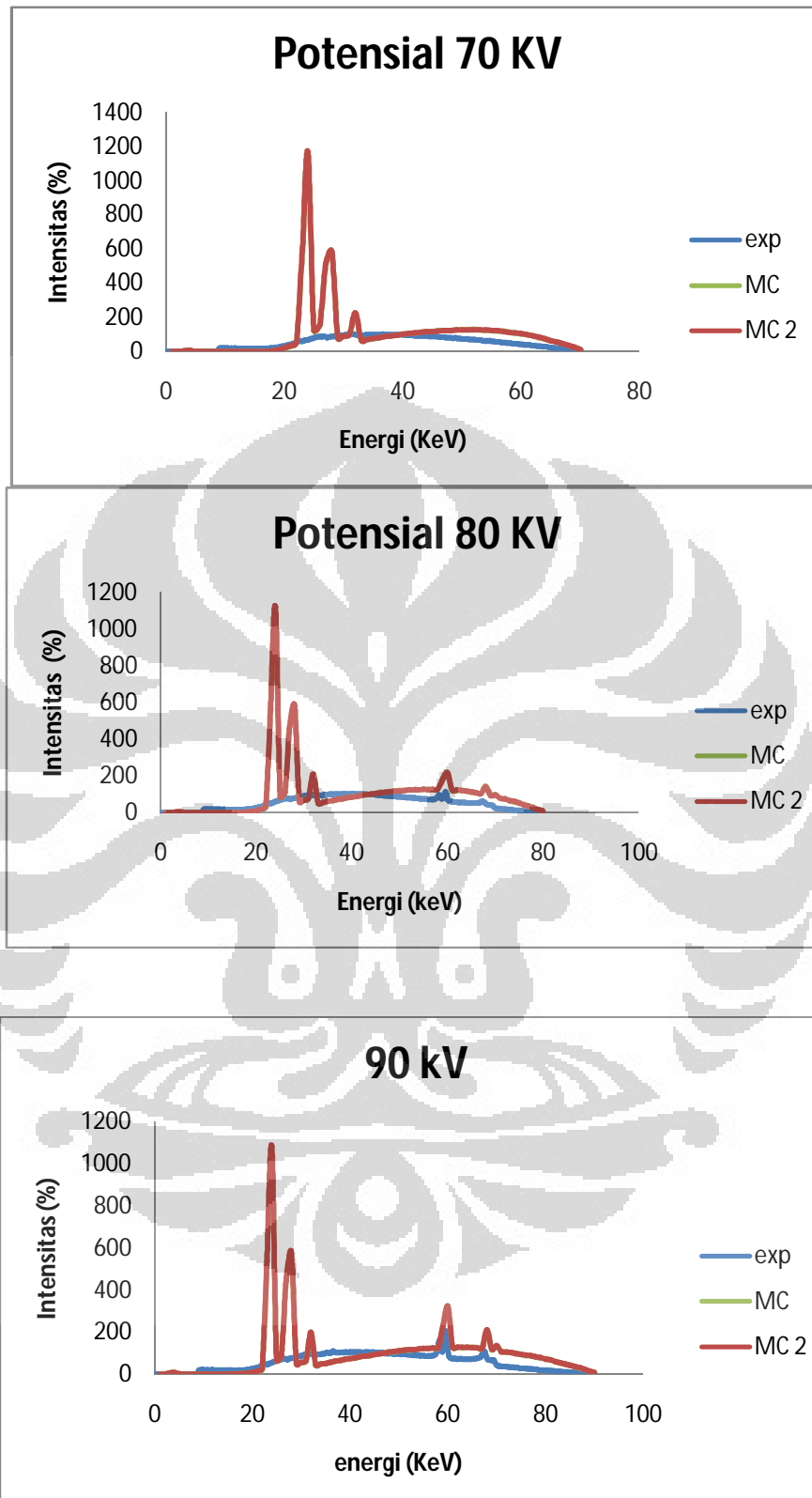
## DAFTAR ACUAN

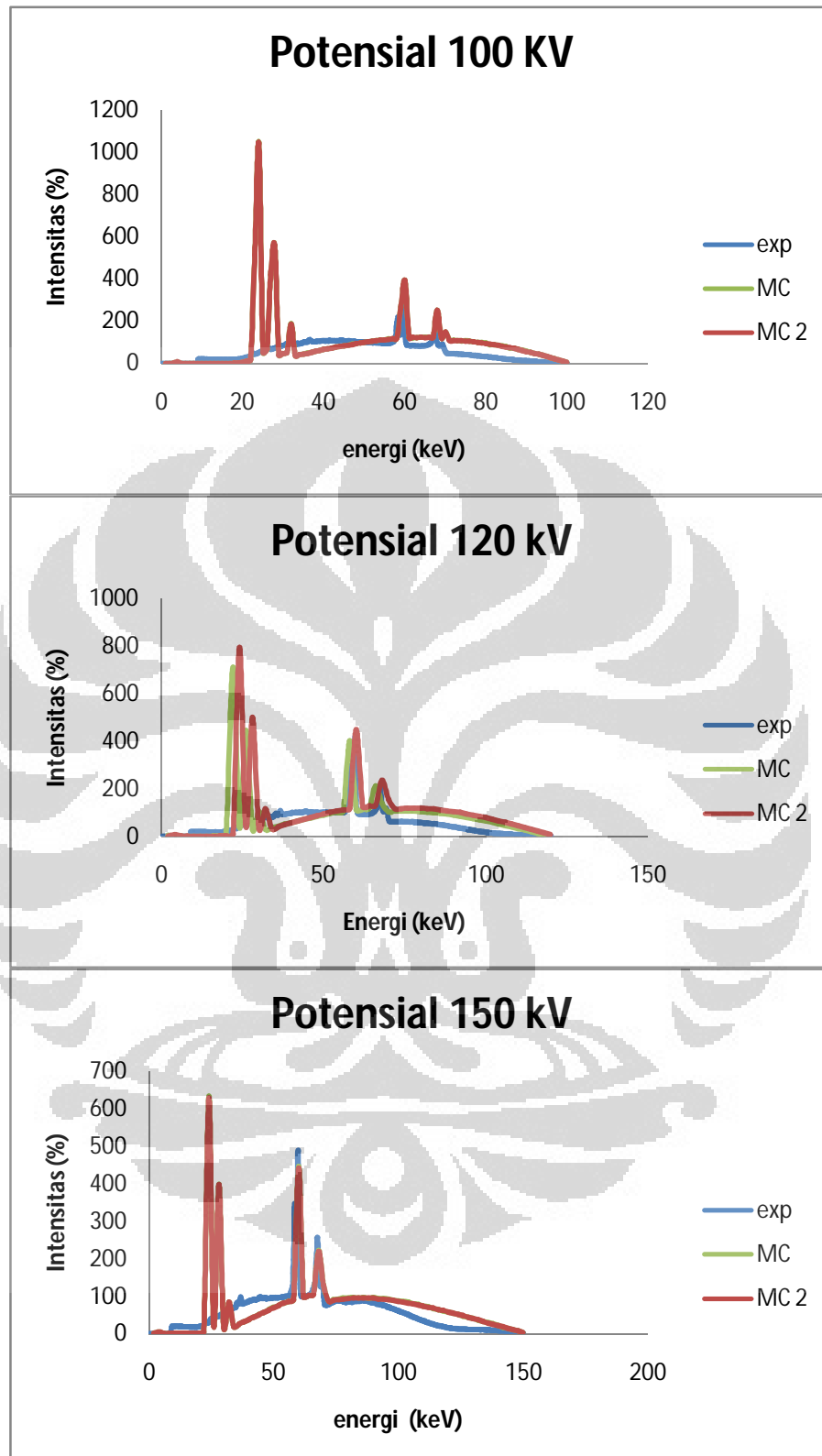
1. Ftp://bmtplib.akh-wien.ac.at/BMTP/Xray/xcomp5r.zip
2. Krane, Kenneth (2006) Fisika Modern. UIP .hal 97-106.
3. Metode Monte Carlo  
  
Metode Monte Carlo-Wikipedia , ensiklopedia bebas-Microsoft internet explorer 3 September pkl 15.21
4. Meyer, P. et al. (2004). *Evaluation Of The Use Of Six Diagnostic X-ray Spectra Computer Codes*. British Journal of Radiology, 77, 224-230.
5. Mainegra, Ernesto et al (2005). User Manual egs\_inprz a GUI for the nrc RZ user-codes. Canada : National Research Council of Canada.
6. Rogers, D.W.O, et al. (2006). BEAMnrc Users Manual. Canada: National Research Council of Canada.
7. Roger, D.W.O et al.(2006). NRC user codes for EGSnrc.. Canada : National Research Council of Canada.
8. Technical Report Series No. 457. (2007). *Dosimetry in Diagnostic Radiology an International Code of Practice*, Vienna: International Atomic Energy Agency. Appendix V, 261.
9. [www.amptek.com](http://www.amptek.com) 3 September 2010 pkl 11.16

## Lampiran 1

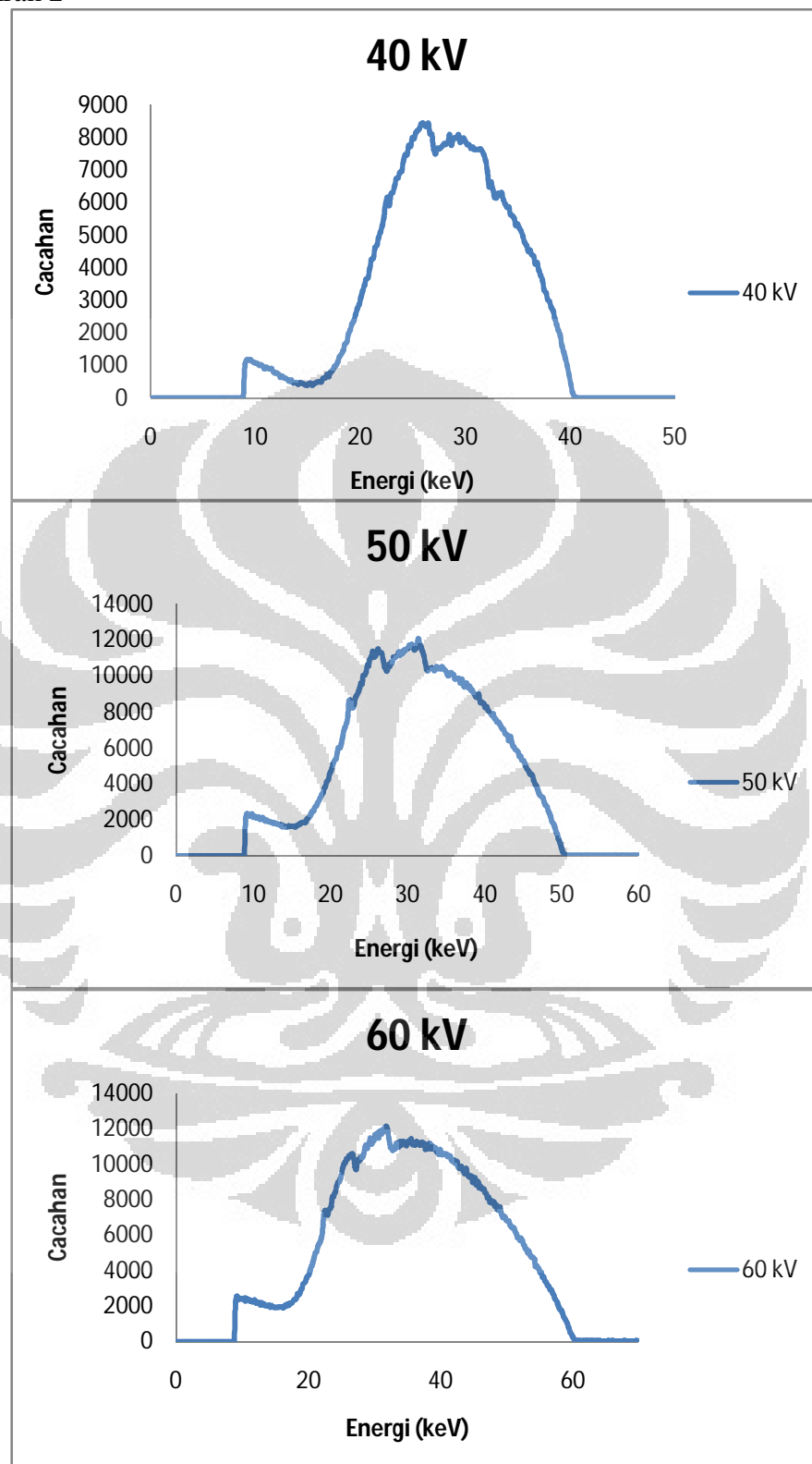


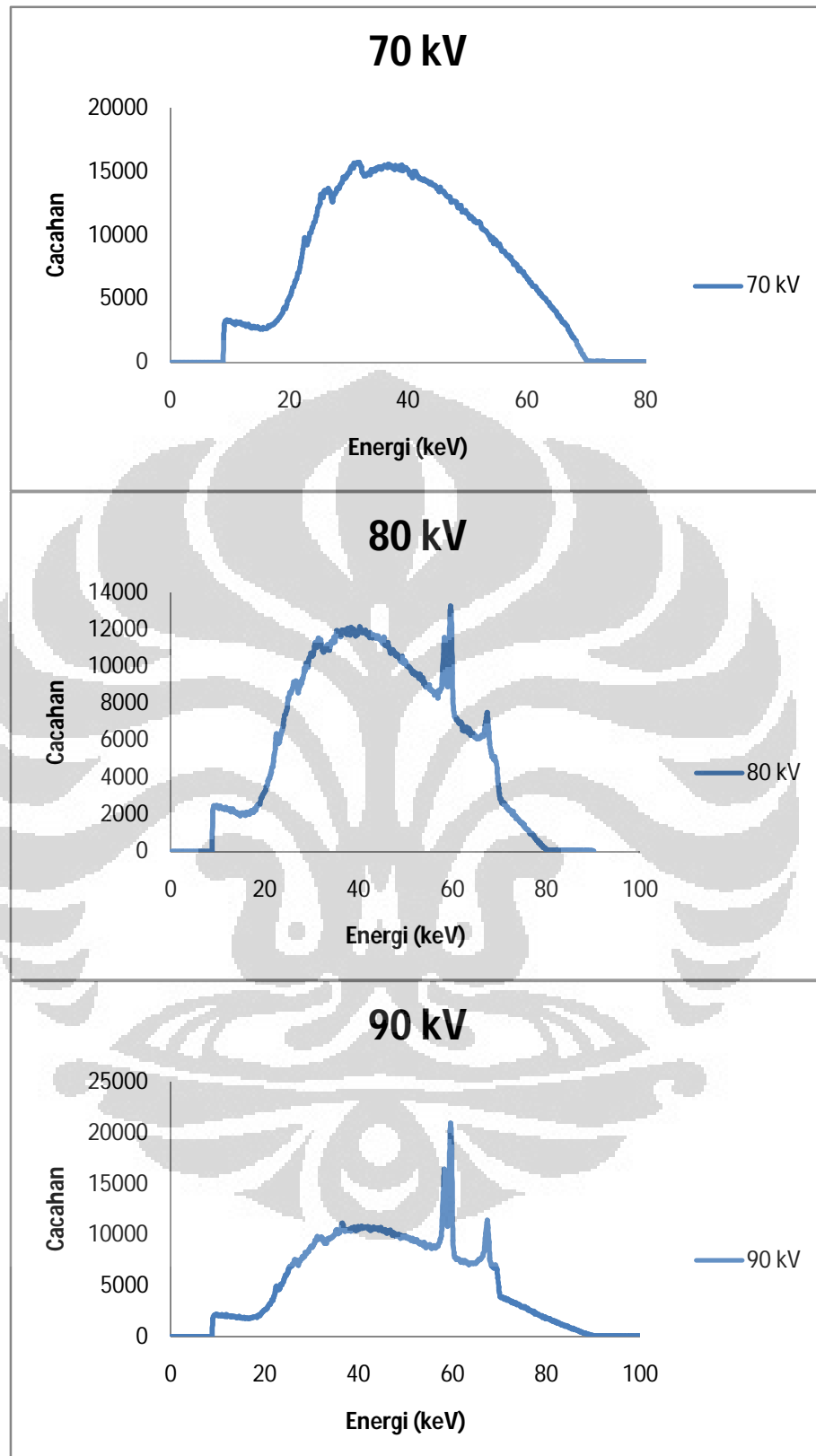


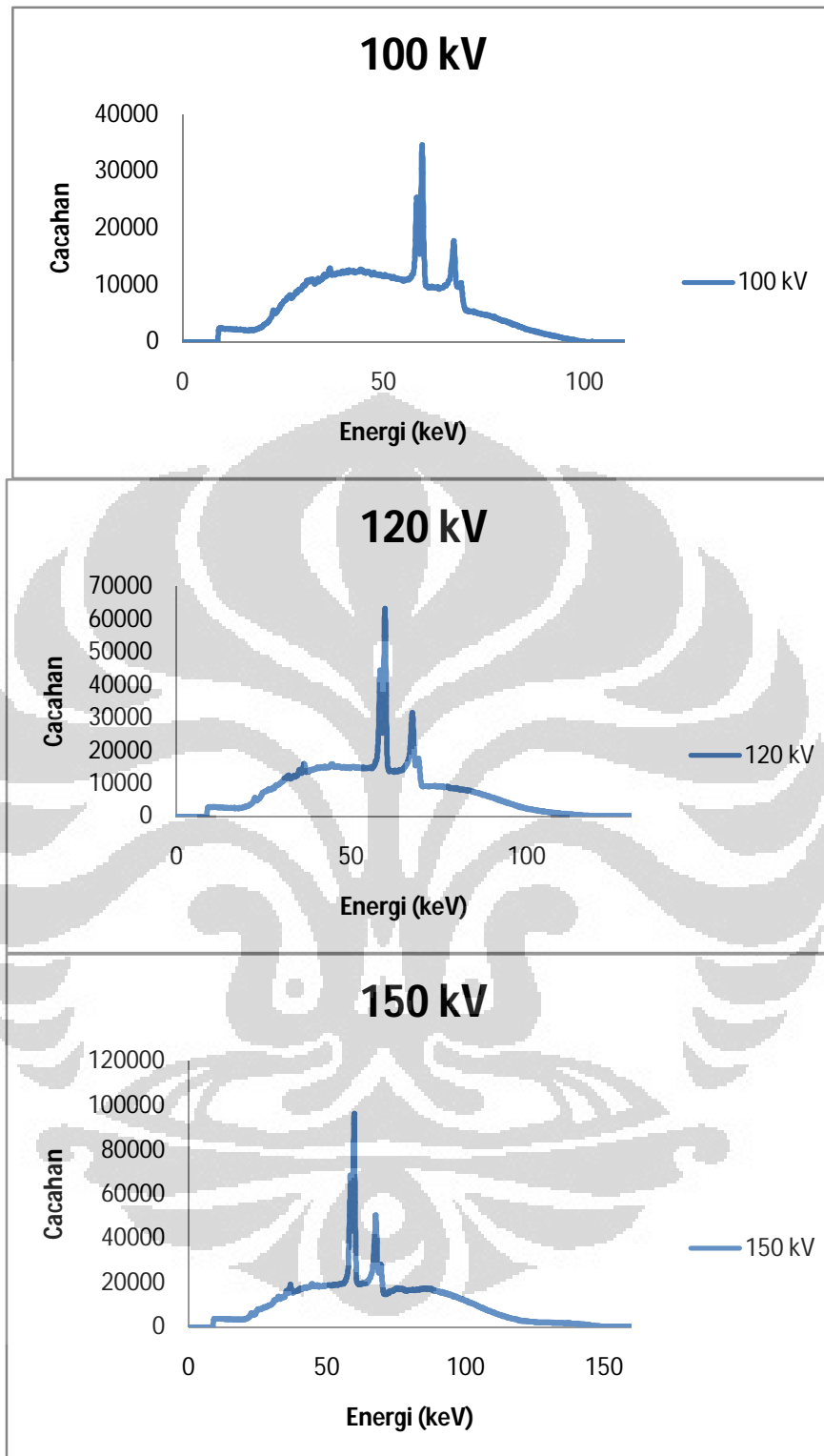




## Lampiran 2

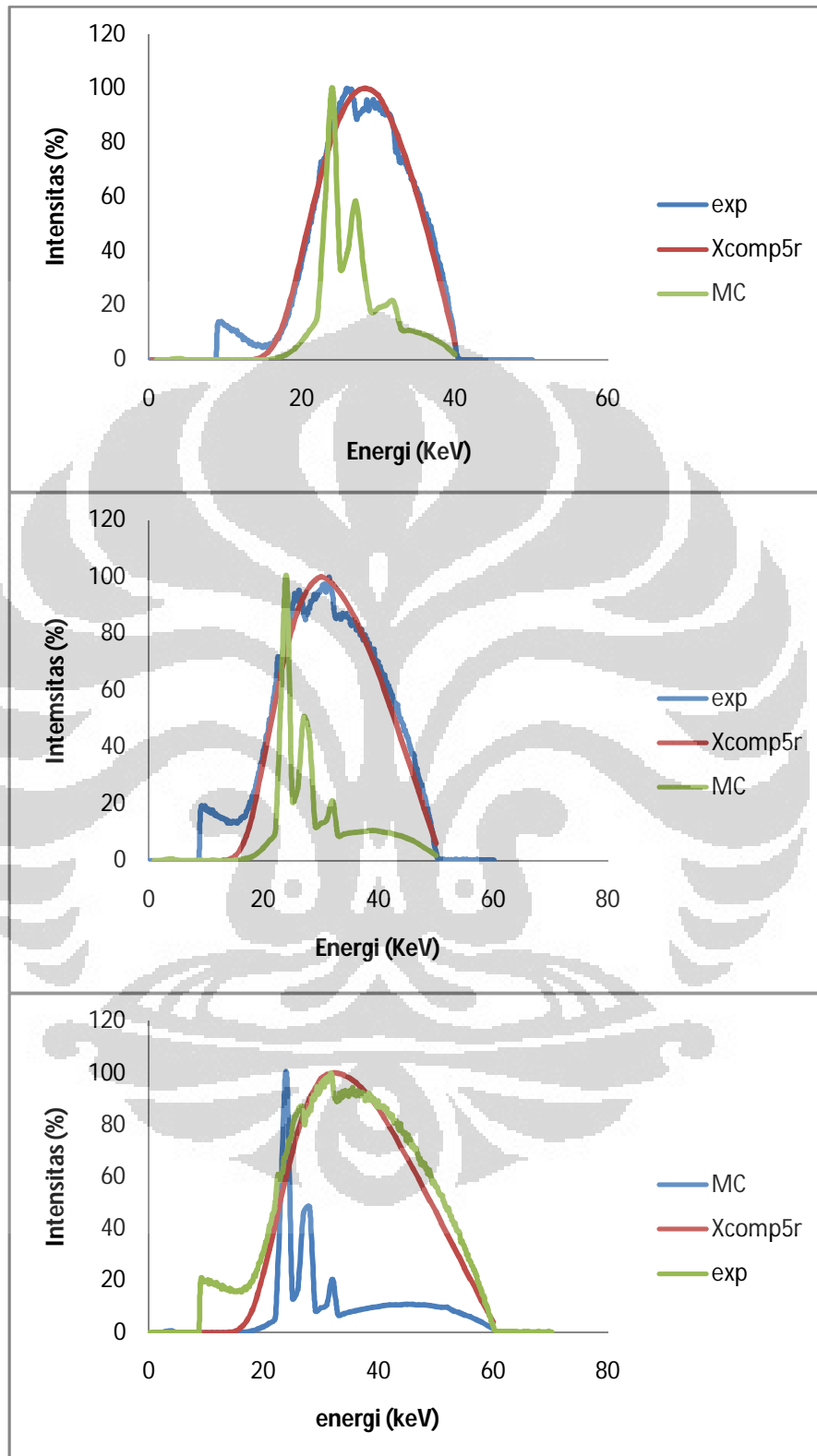


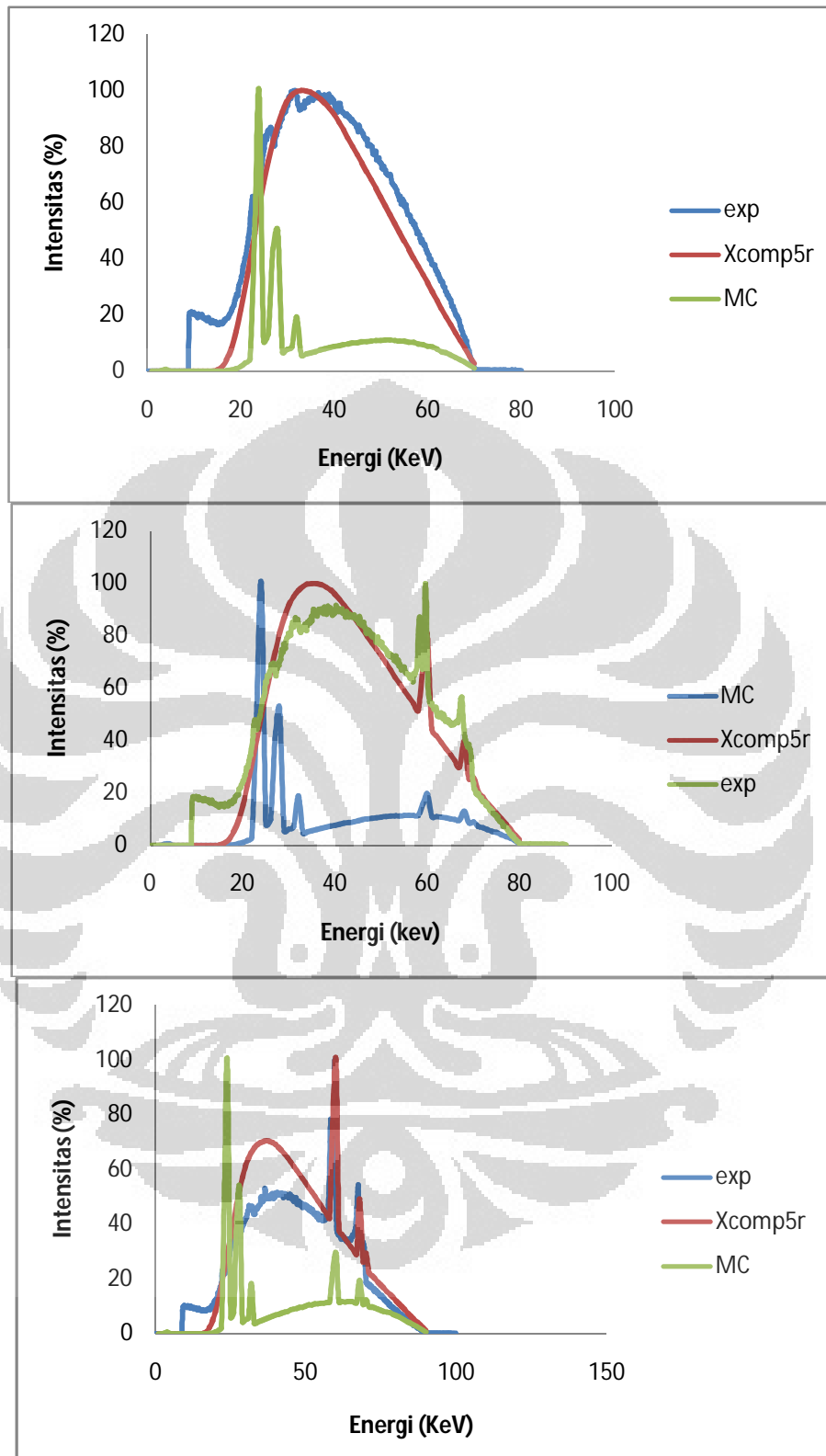


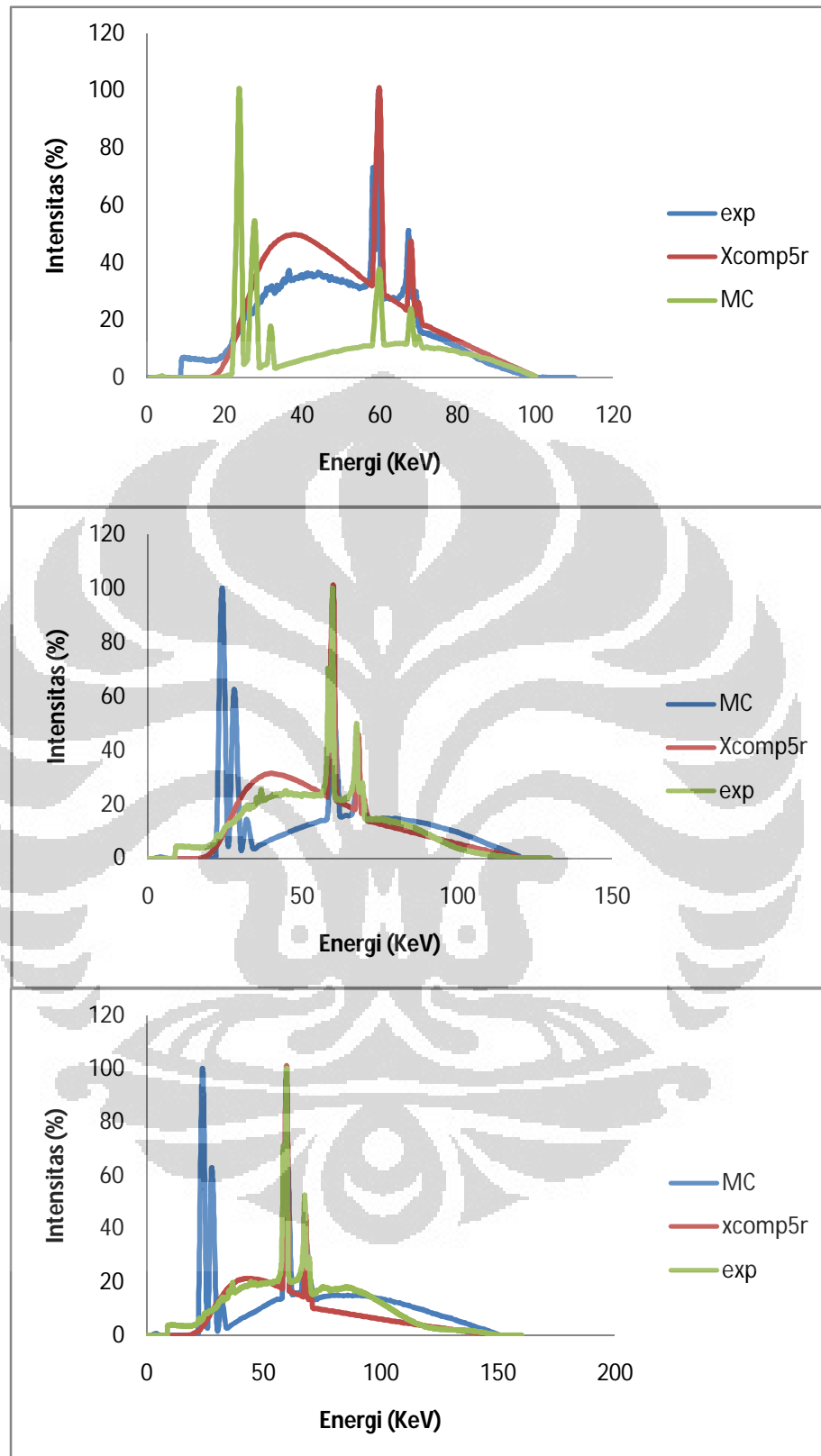


Intan Aprilya R : Pengukuran Spektrum Sinar X dan Karakteristik detektor CdTe.

## Lampiran 3

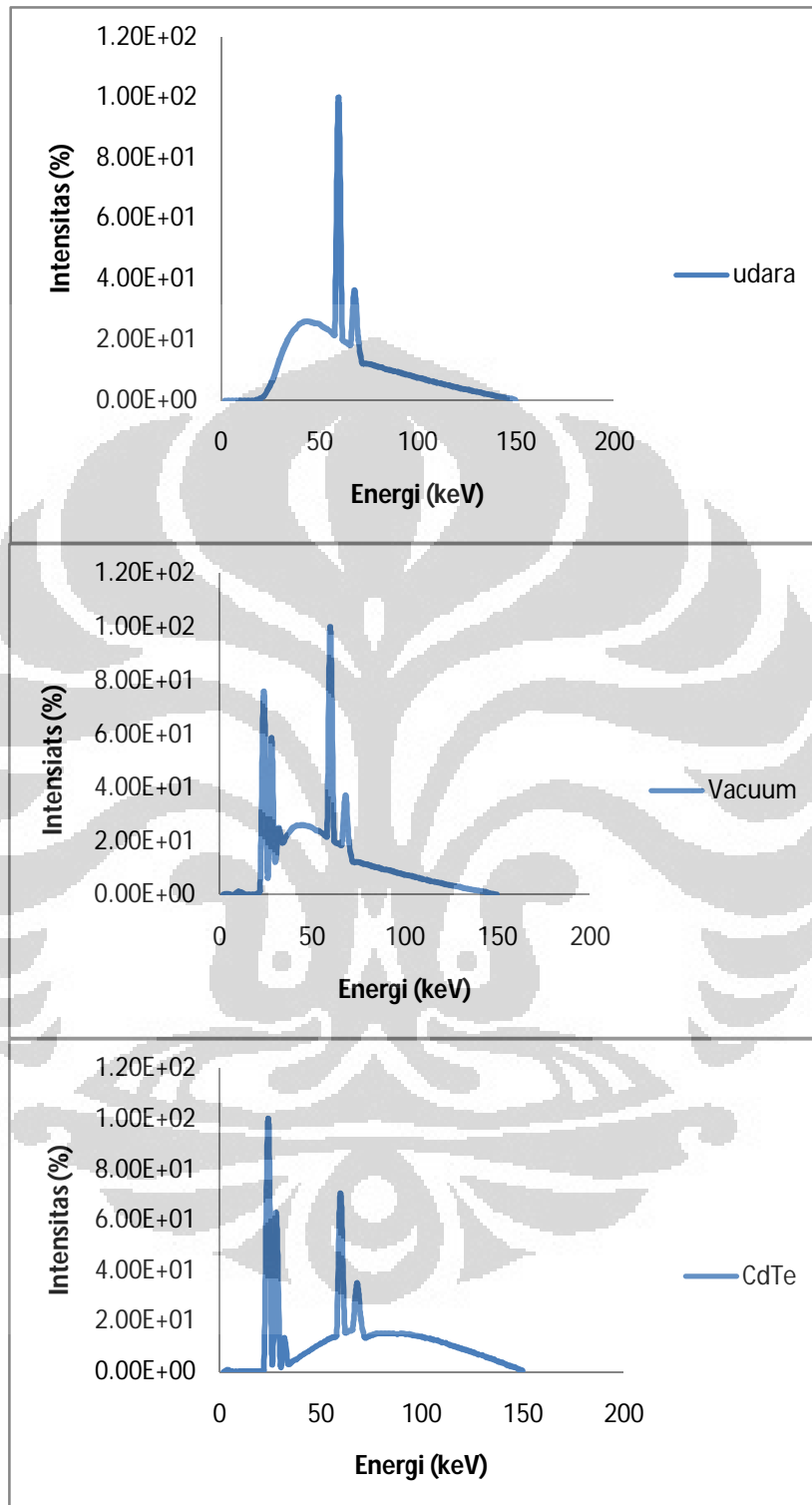




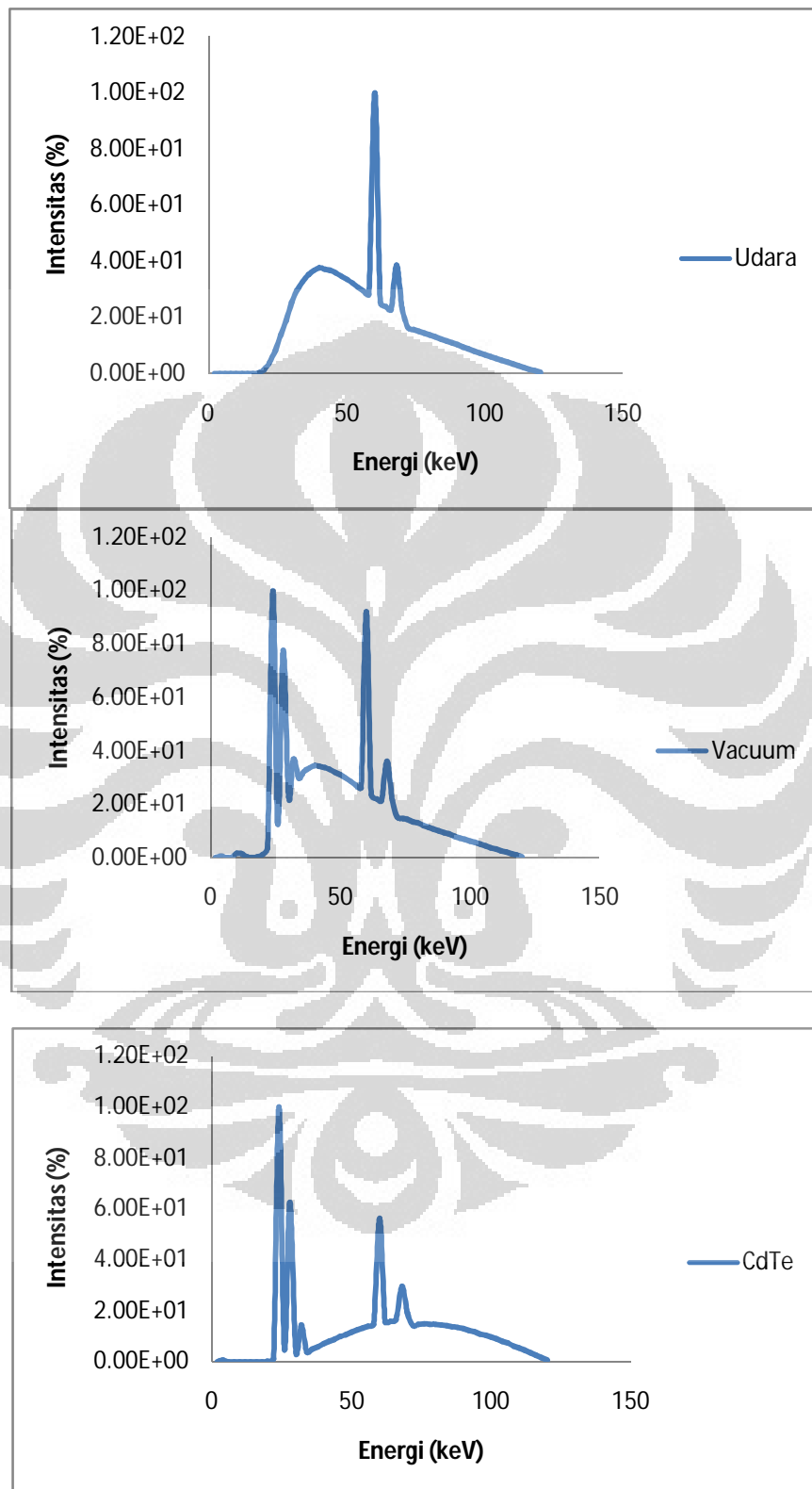




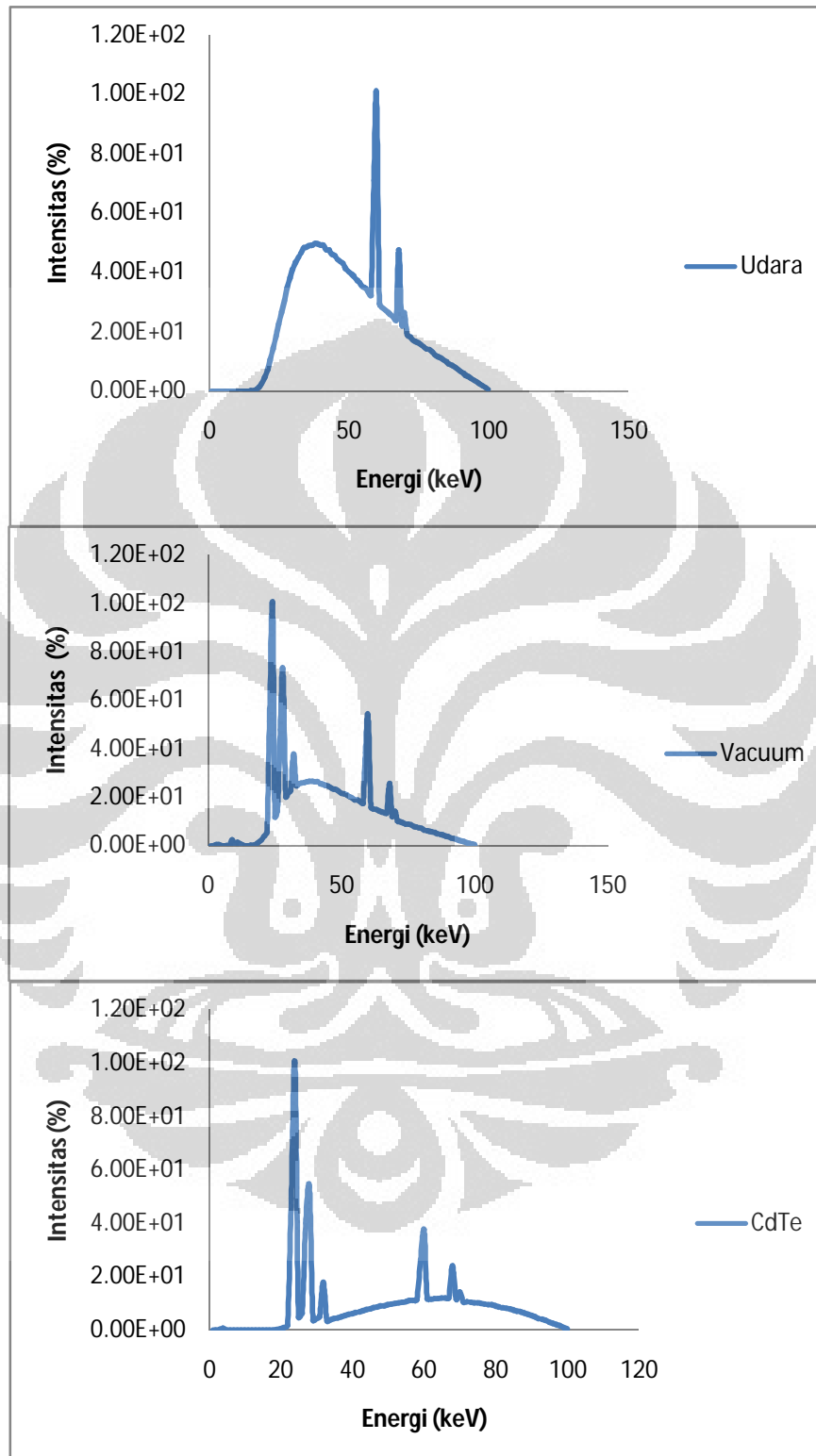
**Lampiran 4**  
Potensial 150 KV.



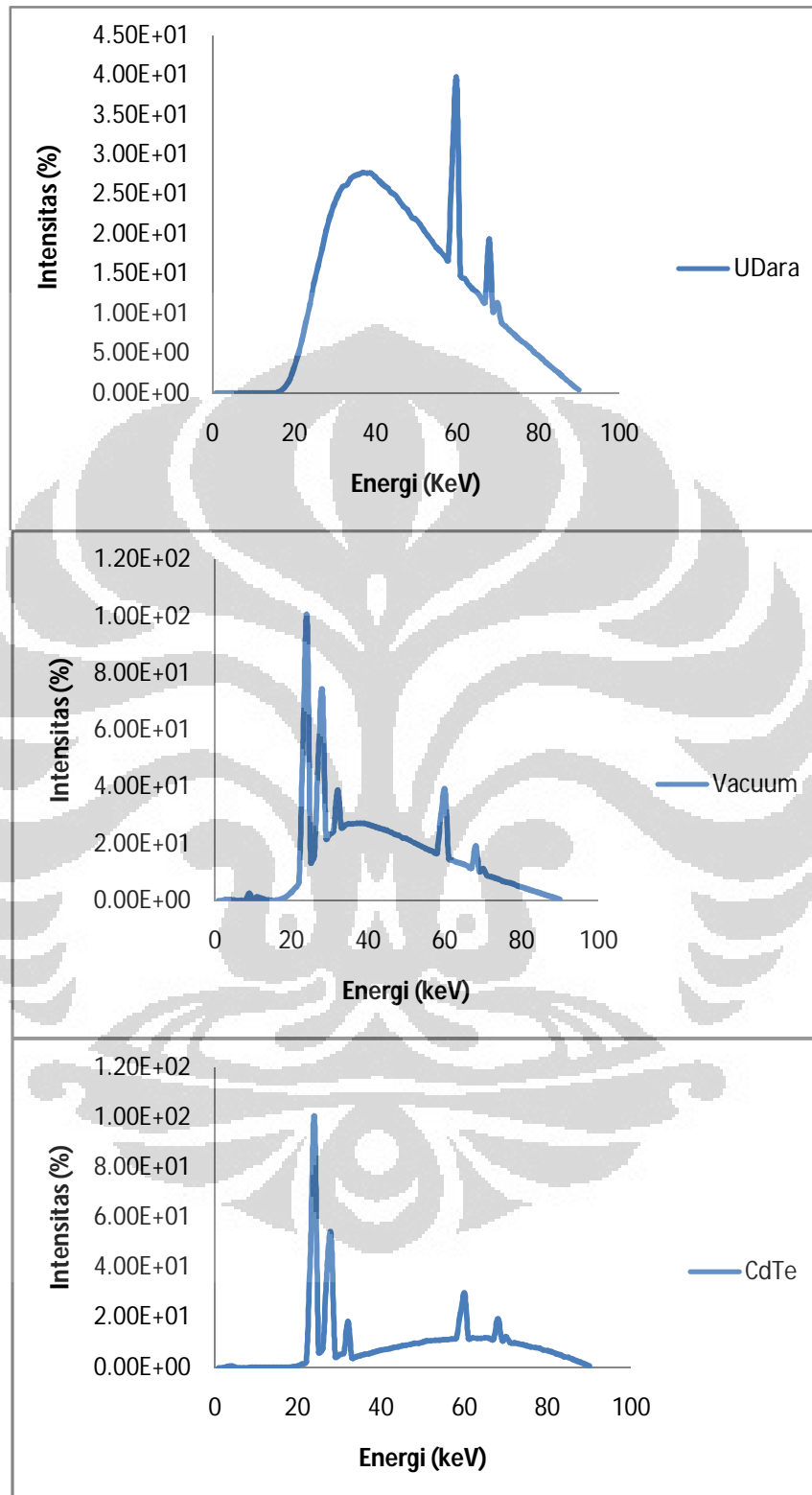
## Potensial 120 kV



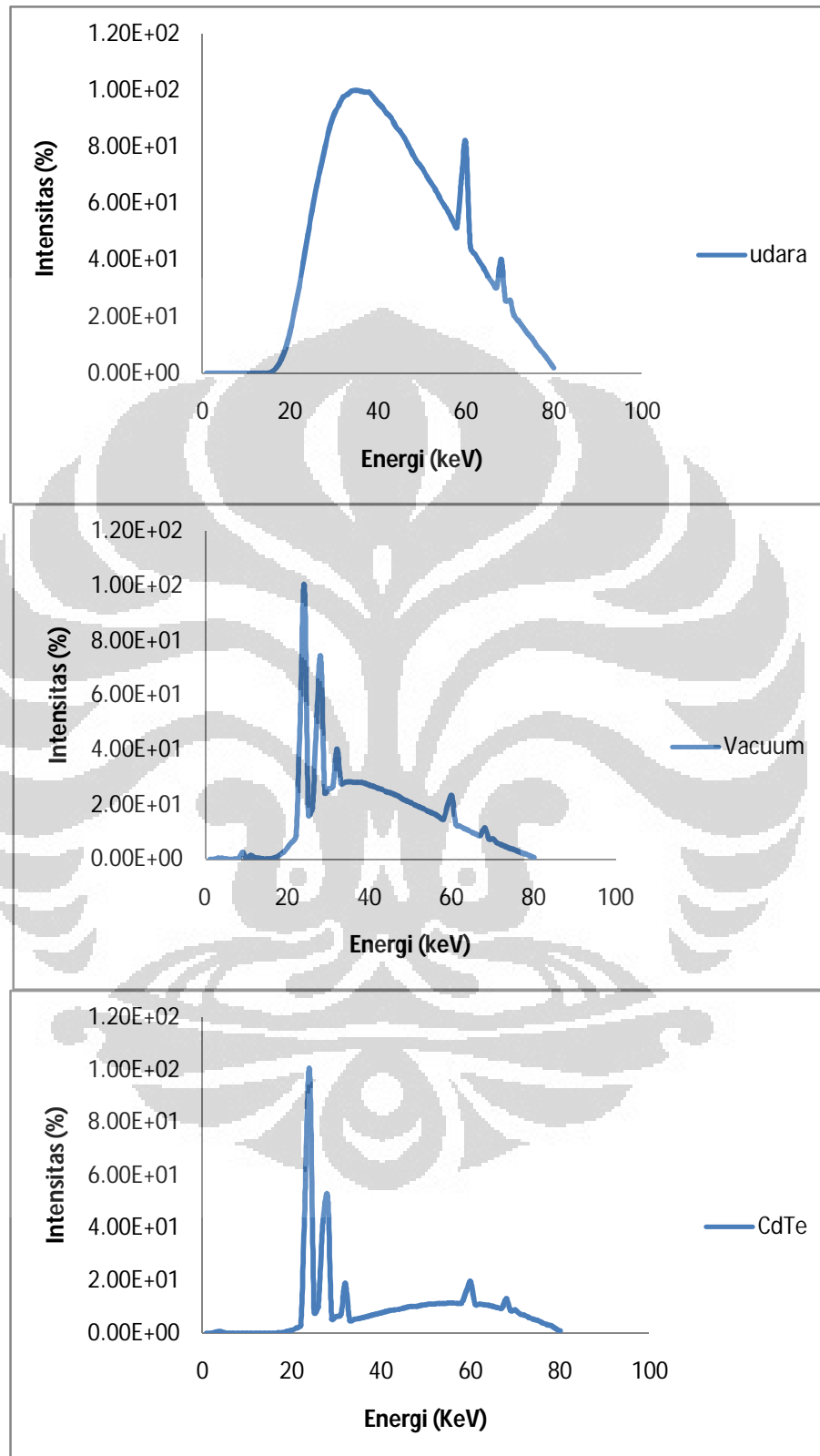
## Potensial 100 kV



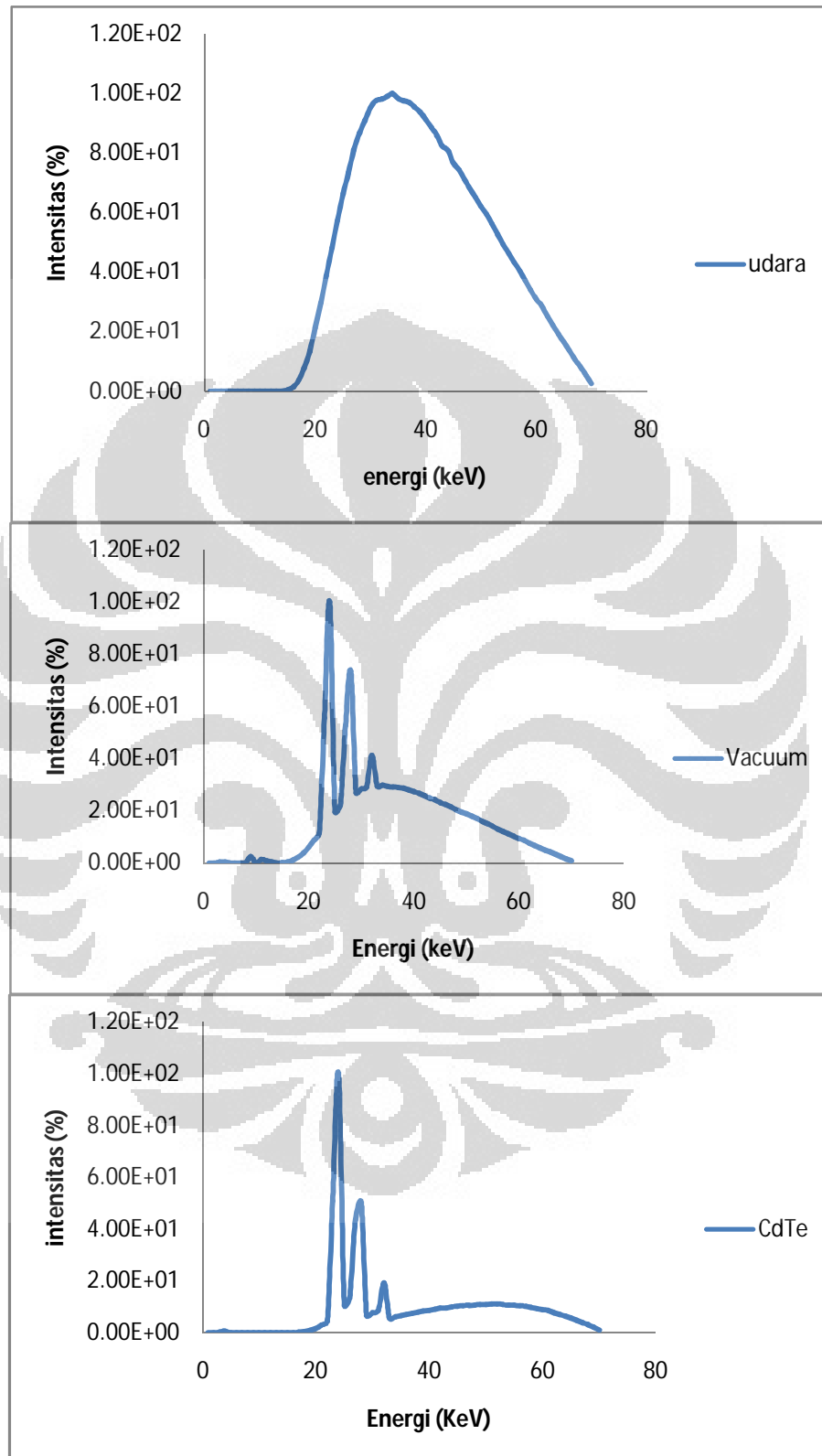
## Potensial 90 kV



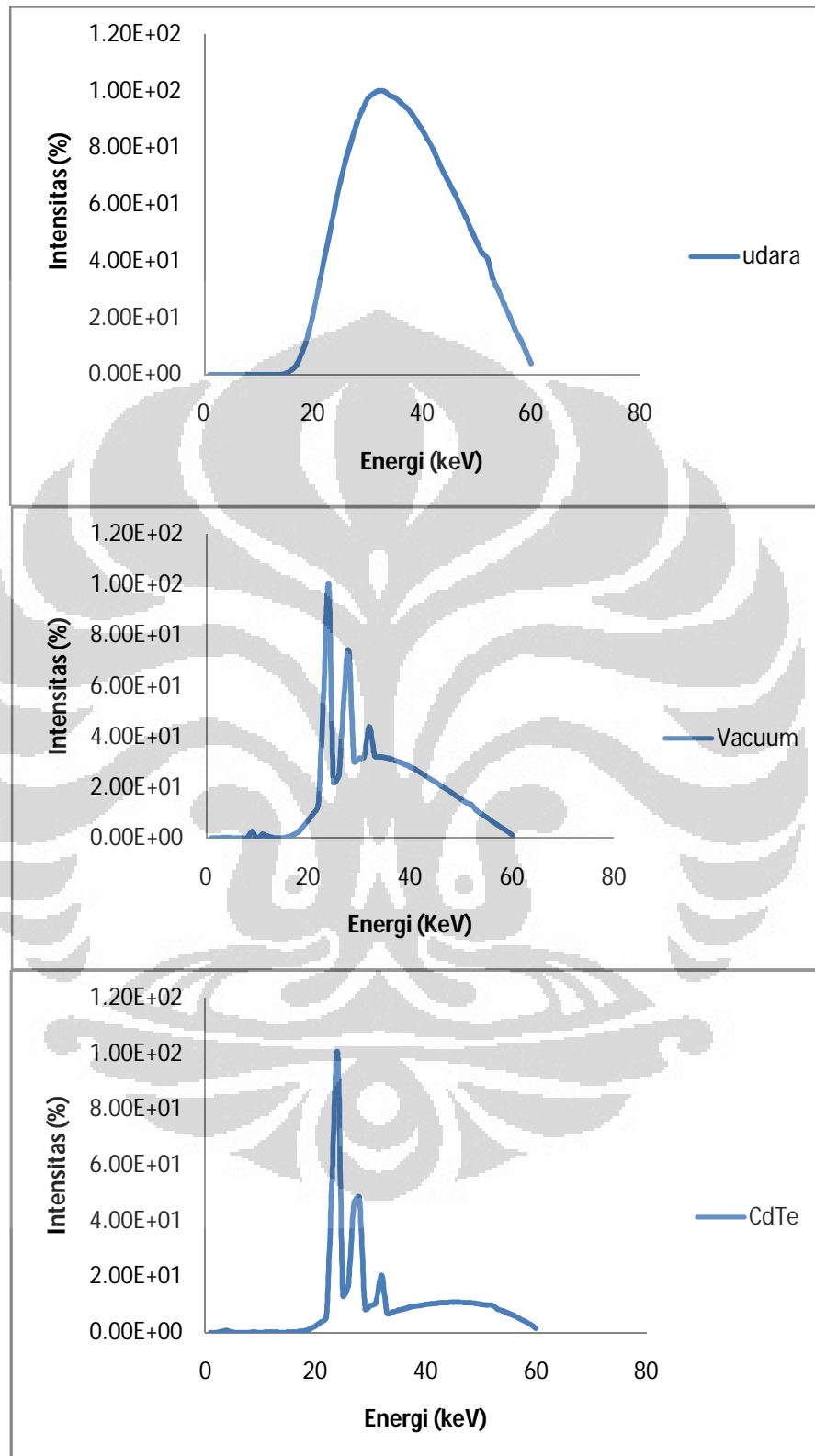
## Potensial 80 kV



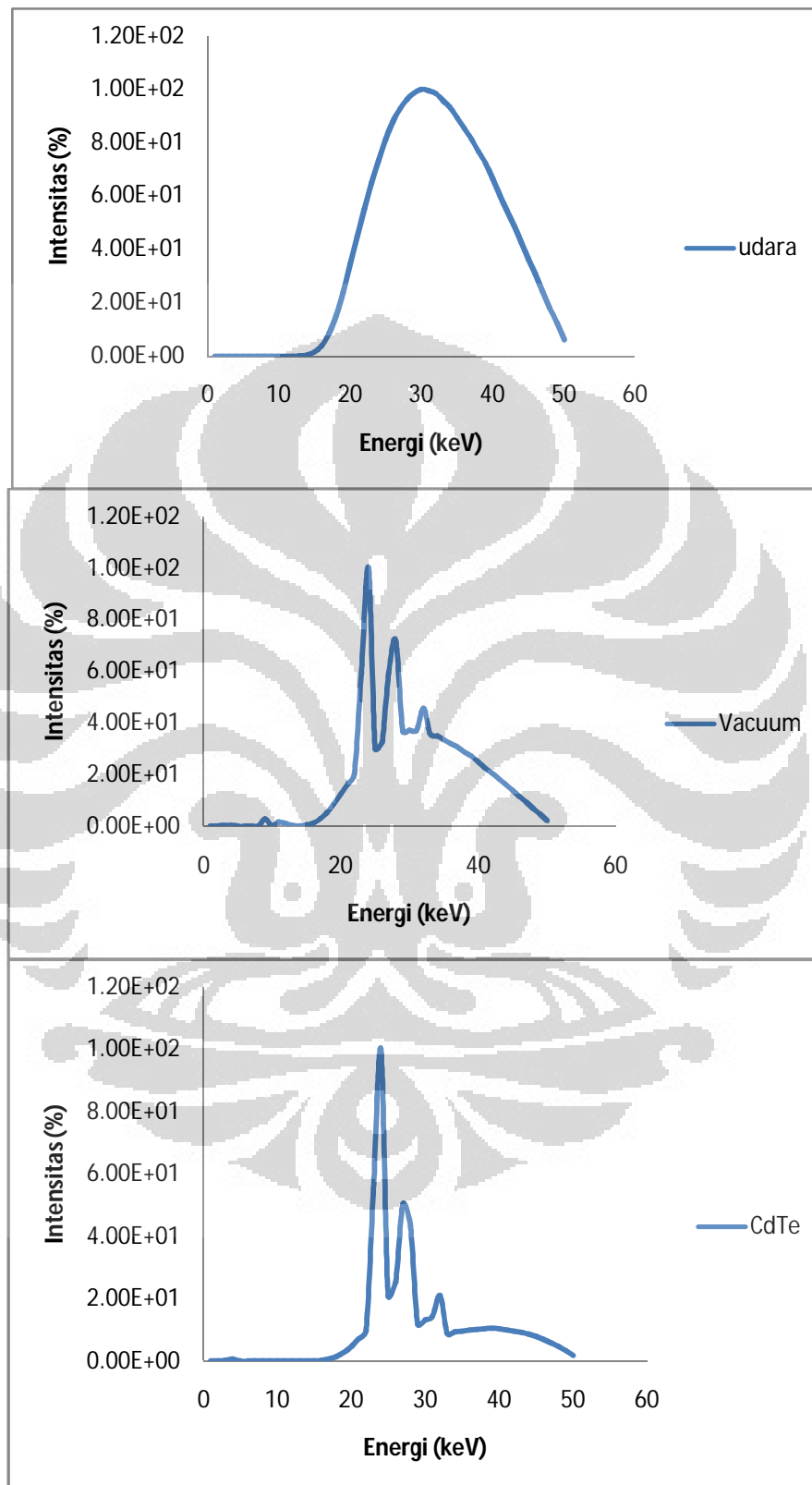
## Potensial 70 kV



## Potensial 60 kV



## Potensial 50 kV



Universitas Indonesia



## Potensial 40 kV

