



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGUKURAN SPEKTRUM SINAR X DAN KARAKTERISASI  
DETECTOR CdTe**

**SKRIPSI**

**INTAN APRILLYA RIZKI**

**0606068303**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI S1 FISIKA**

**PEMINATAN FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA**

**DEPOK**

**DESEMBER 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGUKURAN SPEKTRUM SINAR X DAN KARAKTERISASI  
DETECTOR CdTe**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**INTAN APRILLYA RIZKI**

**0606068303**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI S1 FISIKA**

**PEMINATAN FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA**

**DEPOK**

**DESEMBER 2010**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,  
dan semua sumber baik yang di kutip maupun yang di rujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama** : **Intan Aprillya Rizki**

**NPM** : **0606068303**

**Tanda Tangan** : 

**Tanggal** : **09 Desember 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Intan Aprillya Rizki  
 NPM : 0606068303  
 Program Studi : Fisika  
 Judul Skripsi : Pengukuran Spektrum Sinar X dan Karakterisasi  
 Detektor CdTe

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 : Desember 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan kepada Allah SWT dan Rasulnya, Nabi Muhammad SAW. Karena atas rahmatnya penulis dapat menyelesaikan Penulisan Pengantar Tugas Akhir dengan judul “Pengukuran Spektrum Sinar X dan Karakterisasi Detektor CdTe” ini dapat terselesaikan. Penulisan Pengantar Tugas Akhir ini digunakan untuk melengkapi sebagian syarat untuk mencapai jenjang Strata 1 (S1) di Program studi Fisika Medis dan Biofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa Penulisan Pengantar Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna baik dalam penulisan, karena keterbatasan kemampuan penulis. Namun demikian diharapkan agar Penulisan Pengantar Tugas Akhir ini dapat memenuhi syarat yang diperlukan. Dalam kesempatan ini perkenankanlah penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dorongan dan bantuan yang telah diterima sehingga memungkinkan untuk menyelesaikan Penulisan Ilmiah ini kepada :

1. Bapak Dwi Seno K, M.Si selaku pembimbing I dan Bapak Heru Prasetyo M,Si selaku pembimbing II. Terima kasih untuk waktu, nasehat dan kesabarannya dalam membimbing dan menyelesaikan penulisan ini.
2. Ibu Seruni U Freisleben selaku penguji I dan dosen biokimia yang telah memberikan masukan saran dan kritik dalam penulisan tugas akhir ini, serta kesabaran dalam pengarahan di mata kuliah biokimia.
3. Ibu Kristina Tri wigati M.si selaku penguji II yang telah menyempatkan waktu dalam diskusi dan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Supriyanto M,Sc selaku koordinator mahasiswa dan dosen yang selalu meluangkan waktunya untuk mendengarkan cerita-cerita saya dalam segala hal.
5. Peneliti BATAN Pasar Jumat dan Peneliti BATAN Mampang yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Staff kesekretariatan Departemen Fisika UI Mba Ratna, Mas Mardi dan Pihak lainnya yang penulis tidak dapat sebutkan satu per satu tanpa mengurangi rasa hormat.
7. Staff perpustakaan Departemen Fisika UI Mas Heri, yang telah memberikan waktu dan tempatnya untuk belajar dan merampungkan tugas akhir ini.

8. Teman – teman fisika 2006 Nugraheni, Sri Elsa, Mursilatun, Nurina KD, Nurmaliah, Puspita dan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, yang senantiasa memberikan semangat dan doa.
9. Kedua Orang Tua yang selalu memberikan kasih sayang, semangat, dukungan dan mendoakan agar tugas akhir ini selesai tepat waktu. Adikku yang selalu mendengarkan kesulitan yang saya hadapi serta kekasih yang telah memberikan waktu, tenaga, doa, dan kesabarannya.
10. Tiara A (ayay), Annisa Sarah (momoi), Robiatul Adawiyah (atun) si bajay group yang selalu memberikan saya support, Muhammad Harfan (arfan) si pria yang selalu menjadi pengawal si wanita. Sukses selalu untuk kita.
11. Teman – teman Fisika Medis UI Ahmad Fauzi, Kak Icha, Kak Rifky, Lisa Diana, Lisa Rini, Dwi Oktavina, Richard Immanuel dan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu terima kasih setiap dukungan, saran dan masukan serta ilmunya dalam penyelesaian Penulisan maupun Perancangan Tugas Akhir ini.
12. Serta teman – teman Fisika Universitas Indonesia angkatan atas maupun angkatan bawah yang penulis tidak bisa sebutkan satu persatu yang telah banyak membantu dan memberikan saran, doa serta dukungannya.

Oleh karena itu penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya atas kekurangan. Penulis berharap bahwa Penulisan Ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua, Amin.

Depok , Desember 2010

Penulis

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

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

Nama : Intan Aprillya Rizki  
NPM : 0606068303  
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 Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

*PENGUKURAN SPEKTRUM SINAR X DAN KARAKTERISASI DETEKTOR CdTe*

Berserta perangkat yang ada (jika di perlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-ekklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Di buat di : DEPOK

Pada tanggal :

Yang menyatakan



(Intan Aprillya Rizki)

**ABSTRAK**

Nama : Intan Aprillya Rizki

NPM : 0606068303

Judul : Pengukuran Spektrum Sinar X dan Karakterisasi Detektor CdTe

Penentuan spektrum sinar X perlu dilakukan untuk mengetahui kualitas radiasi yang keluar dari tabung sinar X, selain karakteristik detektor yang digunakan untuk pengukuran yang harus diketahui untuk mencegah terjadinya kesalahan penafsiran spektrum hasil pengukuran. Penelitian ini menggunakan pesawat sinar X YXLON YTU – 320 D303 dan menggunakan detektor XR – 100 – CdTe serta software XCOMP5R. model pesawat ini diletakkan pada jarak 100 cm dari detektor, dengan ketebalan detektor CdTe sebesar 1 mm dan berjari – jari sebesar 0.15 mm. Penelitian juga mencari hubungan spektrum sinar X dengan XCOMP5R untuk mencari karakteristik detektor CdTe dengan mengasumsikan spektrum XCOMP5R sebagai spektrum ideal, dari spektrum sinar X pengukuran dapat diketahui karakteristik dari detektor CdTe tersebut. Karakteristik detektor yang muncul pada saat pengukuran adalah energy K edge dan sinar X karakteristik Cd dan Te yaitu Cd nilai K edge 26.704 keV, ka1 22.982 keV, ka2 23.172 keV, kb1 26.093 keV, kb2 26.641 keV. Te nilai K edge 31.800 keV, Ka1 27.200 keV, Ka2 27.471 keV, Kb1 30.993 keV, Kb2 31.698 keV. Sebelum melakukan pengukuran spektrum, kita harus mengetahui karakter detektor untuk mencegah terjadinya penafsiran data.

Kata kunci : karakteristik detektor, sinar



## ABSTRACT

Name : Intan Aprillya Rizki  
NPM : 0606068303  
Tittle : X-ray Spectrum Measurement and Characterization of CdTe Detectors

Determination of the X-ray spectrum is important to know the quality of the radiation of the X-ray tubes, in the other hand it is important to characterize the detector used for measurement to prevent misinterpretation of the spectrum from measurement results. The study use X-ray tube YXLON YTU - 320 D303 and using the detector XR – 100 – CdTe and XCOMP5R software. X-ray tube model is placed at a distance of 100 cm from the detector, CdTe detector with a thickness of 1 mm and the fingers of 0.15 mm. the studies also aim spectrum and also to characterize it to find relation between XCOMP5R X-ray spectrum and CdTe detector by assuming the spectrum XCOMP5R as an ideal spectrum. Detector characterize that appears at measurement is the energy of K edge and X-ray characteristics of Cd and Te. The value of Cd, K edge is 26.704 keV, Ka1 is 22.982 keV, Ka2 is 23.172 keV, Kb1 is 26.093 keV, Kb2 is 26.641 keV. Values of Te, K edge is 31.008 keV, Ka1 is 27.200 keV. Ka2 is 27.471 keV, Kb1 is 30.993 keV, Kb2 is 31.698 keV. Before using detector for measurements, we must know the characteristics of detector it is important that.

Key words: characterization, detector, X-ray

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINAL.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
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
2.1.1 Sinar X Karakteristik.....	5
2.1.2 Sinar X Bremstrahlung.....	7

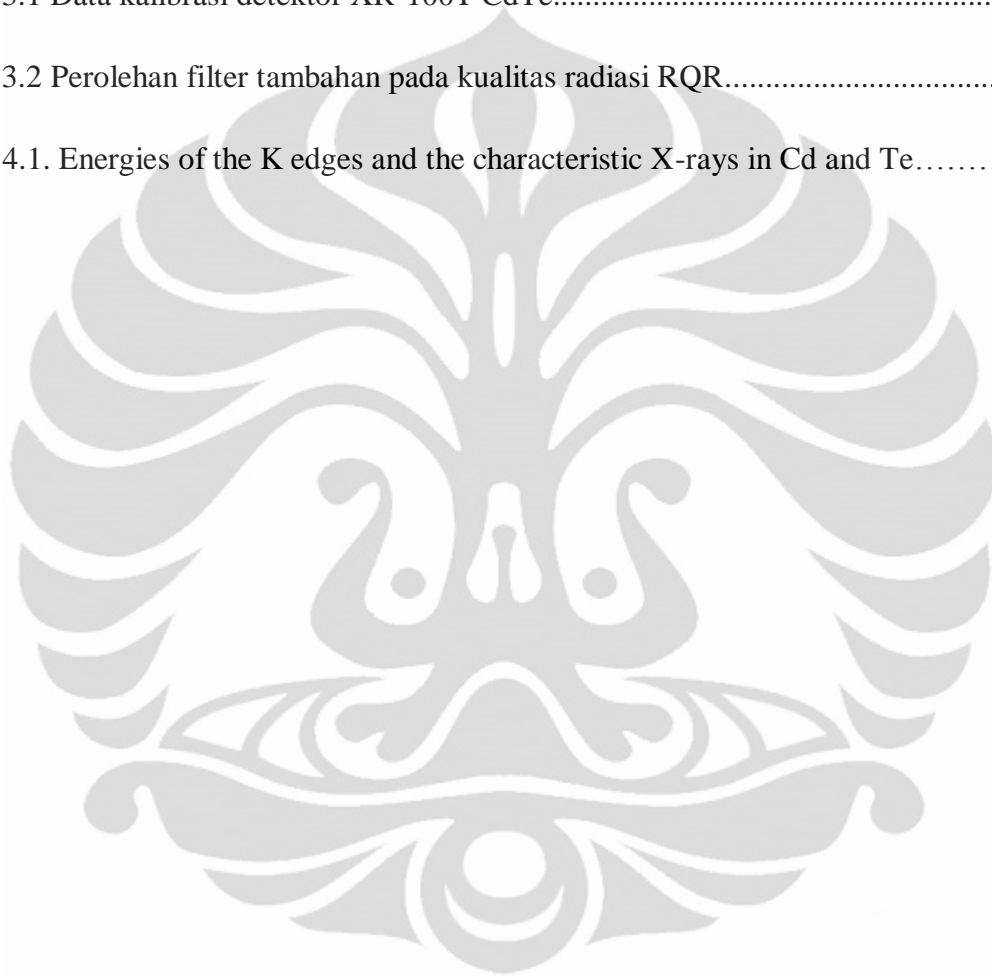
2.2 Interaksi Radiasi dengan Materi.....	8
2.2.1 Efek Fotolistrik.....	8
2.2.2 Efek Compton.....	9
2.3 Alat Ukur Radiasi .....	10
2.3.1 Detektor CdTe.....	10
2.3.2 Teori Operasi.....	10
2.3.3 Efisiensi Detektor.....	12
2.4 Penentuan Spektrum Energi Menggunakan Xcomp5r.....	12
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>13</b>
3.1 Pemodelan Alat dan Bahan.....	13
3.2 Pengukuran Spektrum Sinar X.....	14
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>17</b>
4.1 Pengukuran Spektrum Sinar X dengan Detektor CdTe.....	17
4.2 Perbandingan Spektrum Sinar X Detektor CdTe dengan XCOMP5R.....	20
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>22</b>
5.1 Kesimpulan.....	22
5.2 Saran.....	22
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>23</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>24</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema tabung sinar X beserta komponen penyusunnya.....	4
Gambar 2.2. Spektrum sinar X keluaran tabung sinar X dengan energi maksimum 150 keV ...	5
Gambar 2.3. Bentuk sketsa atom.....	6
Gambar 2.4. Transisi elektron pada tiap kulit yang berbeda disertai emisi foton karakteristik..	6
Gambar 2.5 Produksi Sinar X bremsstrahlung.....	7
Gambar 2.6 Proses terjadinya Hamburan Compton.....	10
Gambar 2.7 ketebalan 1mm efisiensi detektor CdTe.....	11
Gambar 3.1 a.Pesawat Sinar X Y.TU 320 D-302. b Pengontrol Pesawat Sinar X.....	13
Gambar 3.2 Added Filter dengan berbagai ketebalan.....	14
Gambar 3.3 Detektor CdTe dan kolimator.....	14
Gambar 3.4 grafik kalibrasi detektor.....	15
Gambar 4.1. Pengukuran Spektrum sinar X tegangan 40 kV, dengan detektor CdTe.....	19
Gambar 4.2 Pengukuran Spektrum sinar X tegangan 80 kV, dengan detektor CdTe.....	19
Gambar 4.3 Gabungan Spektrum CdTe dengan xcomp5r, dengan tegangan 40 kV.....	20

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Sinar-X Karakteristik Kulit-K dengan target Tungsten.....	7
Tabel 3.1 Data kalibrasi detektor XR-100T CdTe.....	15
Tabel 3.2 Perolehan filter tambahan pada kualitas radiasi RQR.....	16
Table 4.1. Energies of the K edges and the characteristic X-rays in Cd and Te.....	18



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> : Kurva Spektrum Sinar-X dan detektor CdTe dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR.....	24
<b>Lampiran 2</b> : Perbandingan Kurva Spektrum Sinar-X dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR.....	28
Lampiran 3 : Kurva Spektrum Sinar-X menggunakan program xcomp5r dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR.....	33
<b>Lampiran 4</b> : Gabungan Kurva Spektrum Sinar-X dan detektor CdTe dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR.....	37

# **BAB I PENDAHULUAN**

## **1.1 LATAR BELAKANG**

Penggunaan radiasi sinar X saat ini semakin pesat, khususnya di bidang kedokteran. Sinar X ditemukan oleh ilmuwan fisika Wilhelm Conrad Roentgen di akhir tahun 1895. Sinar X mampu menembus jaringan tubuh manusia, dengan adanya penemuan sinar X dapat memenuhi kebutuhan dunia medis. Sinar X dapat bermanfaat untuk pengobatan suatu penyakit tanpa pembedahan. Pemanfaatan sinar X di bidang kedokteran nuklir merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kesehatan pada masyarakat. Dengan adanya radiasi sinar X suatu penyakit atau kelainan organ tubuh dapat lebih awal dan lebih teliti dideteksi, sementara terapi dengan radiasi dapat lebih memperpanjang usia penderita kanker atau tumor.

Dimana salah satu fungsi dari spektrum sinar X adalah untuk menganalisa suatu sistem pencitraan radiografi. Dengan adanya hubungan interaksi antara sinar X dengan materi dapat menghasilkan suatu pencitraan sinar X. Dalam penelitian spektroskopi sinar X ini materi yang digunakan adalah detektor CdTe. Dimana salah satu manfaat penggunaan detektor, diperlukan untuk mengetahui besar dosis yang diperlukan di dalam radiodiagnostik ataupun radioterapi.

Dengan adanya penggunaan detektor pada pengukuran spektrum sinar X ini, dapat diharapkan untuk menghasilkan pengukuran yang lebih tepat. Oleh karena itu, perlu dilakukan kalibrasi terhadap detektor. Proses kalibrasi detektor mengharuskan energi yang digunakan terstandarisasi dengan baik, agar dapat diketahui respon detektor terhadap energi yang digunakan serta diperoleh juga faktor kalibrasi yang sesuai. Dalam penelitian ini akan dilakukan pengukuran spektrum sinar X dari beberapa tegangan pada tabung sinar X, dengan menggunakan detektor CdTe. Pengukuran dengan detektor CdTe ini akan menghasilkan spektrum sinar X dan karakterisasi dari detektor tersebut. Dan untuk menampilkan respon dari detektor tersebut diperlukan suatu filter tambahan.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini merupakan untuk mengukur spektrum sinar X dengan menggunakan detektor CdTe dan karakterisasi dari detektor CdTe tersebut. Pengukuran spektrum sinar X ini dilakukan dengan menggunakan beberapa tegangan pada tabung sinar X yaitu 40 kV, 50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV, 150 kV. Pesawat yang digunakan dalam pengukuran spektrum sinar X ini adalah Y.TU 320 – D03. Selain itu penelitian juga dapat mencari hubungan spektrum sinar X dengan XCOMP5R.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tabung sinar X dengan model detektor XR – 100T – CdTe, dengan tujuan untuk mendapatkan spektrum sinar X dan karakterisasi dari detektor CdTe. Pembatasan masalah pada penelitian ini terdapat pada penggunaan beberapa tegangan pada tabung sinar X yaitu 40 kV, 50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV, 150 kV, dengan filter tambahan yang sesuai dengan tegangan pada tabung sinar X tersebut.

## 1.4 Sistematika Penelitian

Sistematika Penelitian yang dilakukan terdiri dari beberapa tahap antara lain :

a. Pendahuluan

Bagian yang menjelaskan tentang latar belakang dan penelitian yang dilakukan, serta pembatasan masalah yang dilakukan dalam penelitian ini.

b. Tinjauan Pustaka

Pada bab tinjauan pustaka ini akan berisi tentang teori atau prinsip dasar yang melandasi dilakukannya penelitian ini.

c. Metode Penelitian

Pada bab metode penelitian ini akan menjelaskan tentang proses dari kegiatan penelitian dalam mencapai tujuan dari penelitian tersebut. Pada



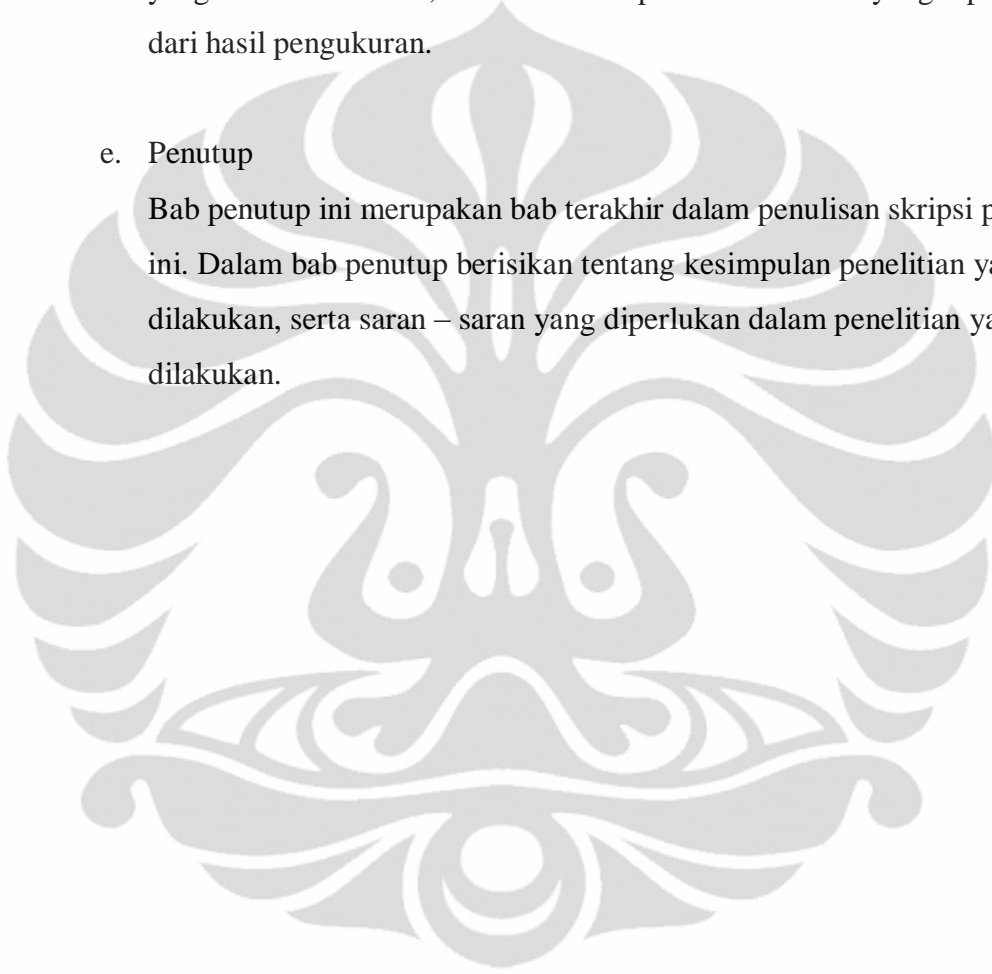
penelitian ini juga akan menjelaskan cara kerja yang dilakukan pada alat sehingga memperoleh sebuah data dalam penelitian.

d. Hasil dan Pembahasan

Bagian yang berisi tentang hasil data yang didapatkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, serta berisikan pembahasan hasil yang diperoleh dari hasil pengukuran.

e. Penutup

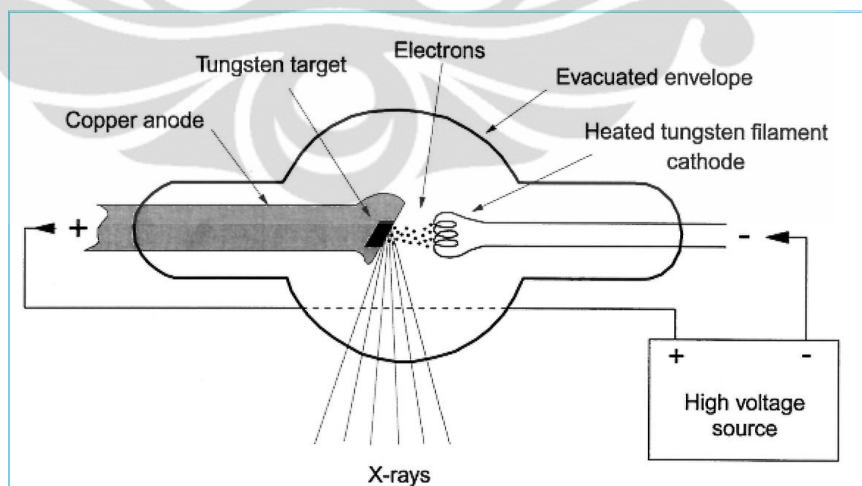
Bab penutup ini merupakan bab terakhir dalam penulisan skripsi penelitian ini. Dalam bab penutup berisikan tentang kesimpulan penelitian yang telah dilakukan, serta saran – saran yang diperlukan dalam penelitian yang telah dilakukan.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

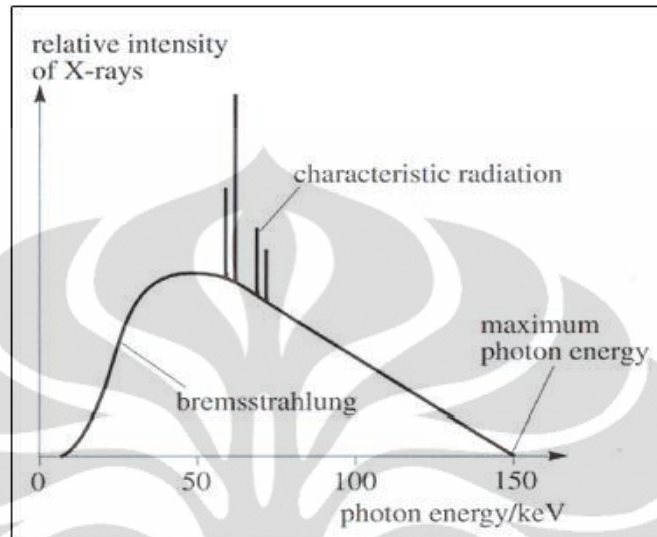
### 2.1 PRODUKSI SINAR X

Sinar X adalah bagian yang disebut dengan spektrum elektromagnetik. Radiasi sinar X merupakan salah satu bentuk jenis gelombang elektromagnetik yang memiliki banyak manfaat pada bidang medis. Sinar X memiliki daya tembus tinggi, foton yang terdapat pada sinar X memiliki energi yang tinggi. Produksi sinar X terjadi pada sebuah tabung hampa udara bertekanan rendah, seperti terlihat pada gambar 2.1. Di dalam tabung sinar memiliki dua bagian yaitu anoda dan katoda. Sinar X merupakan sinar katoda dan termasuk gelombang elektromagnetis. Timbulnya sinar X dikarenakan adanya perbedaan potensial arus searah yang besar di antara kedua elektroda (katoda dan anoda) di dalam sebuah tabung hampa. Berkas elektron tersebut akan di pancarkan dari katoda menuju anoda, dimana pancaran elektron – elektron tersebut dinamakan dengan sinar katoda atau sinar X. Arus listrik yang dipakai yaitu untuk memanaskan filamen sehingga filamen dapat memberi elektron, elektron – elektron ini akan dipercepat dari katoda ke anoda.



Gambar 2.1. Skema tabung sinar X beserta komponen penyusunnya

Sinar X yang dihasilkan yaitu terdiri dari sinar X karakteristik dan sinar X bremsstrahlung. Perbedaan yang terdapat pada kedua sinar X tersebut terjadi pada proses interaksi dan bentuk spektrum. Seperti terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Spektrum sinar X keluaran tabung sinar X dengan energi maksimum 150 keV

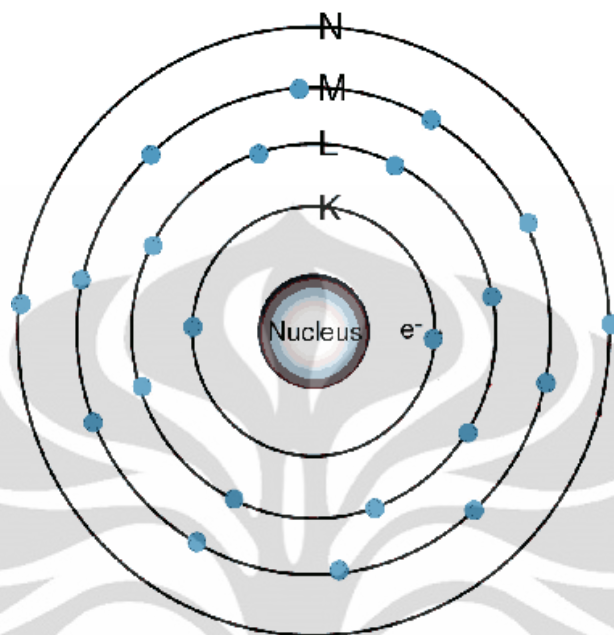
### 2.1.1 Sinar X Karakteristik

Elektron dari katoda yang bergerak dengan percepatan yang cukup tinggi mengenai elektron dari atom target (anoda) sehingga dapat menyebabkan elektron tereksitasi dari atom, dan elektron yang berada pada sub kulit yang lebih tinggi akan mengisi kekosongan yang ditinggalkan oleh elektron tersebut. Sinar X yang memiliki energi sebanding dengan level energi elektron.

Sinar X yang terbentuk dalam proses perpindahan elektron – elektron atom dari tingkat energi yang lebih tinggi menuju tingkat yang lebih rendah. Sinar X karakteristik yang timbul oleh perpindahan elektron dari suatu tingkat energi menuju ke lintasan K, disebut sinar X garis K, sedangkan yang menuju ke lintasan L disebut sinar X garis L, dan seterusnya.

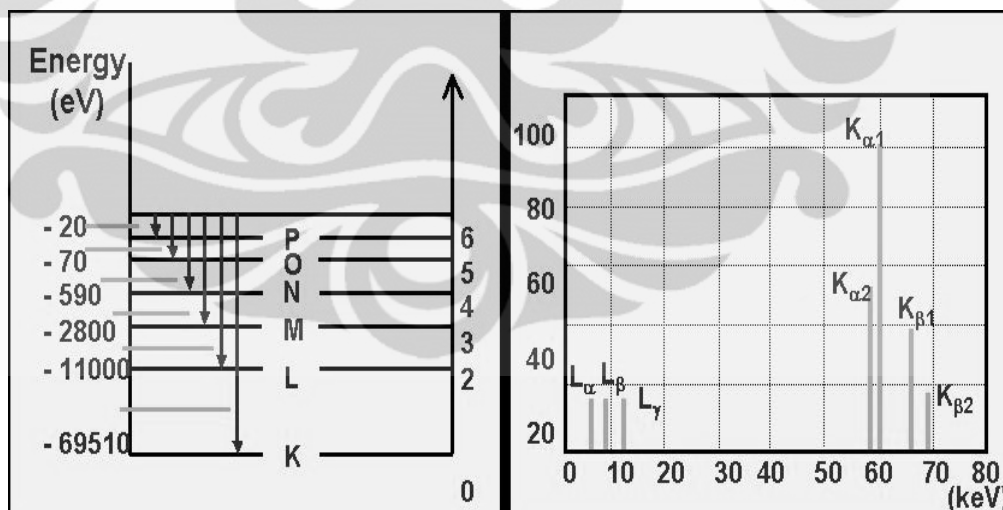
Sketsa atom menunjukkan berbagai tingkat atom pada kulit terlihat pada gambar 2.3. sinar X karakteristik tersebut berbeda – beda tergantung pada transisi elektron pada kulit diperlihatkan pada gambar 2.4. Transisi elektron dari kulit yang berbeda akan menghasilkan jenis foton karakteristik yang berbeda pula

dengan energi yang berbeda tergantung pada energi ikatan elektron dalam kulit atom, misalnya sinar X karakteristik kulit K pada tabel 2.1.



\*[http://www.science-class.net/Notes/AtomicStructure\\_notes\\_8th.htm](http://www.science-class.net/Notes/AtomicStructure_notes_8th.htm)

Gambar 2.3. Bentuk sketsa atom



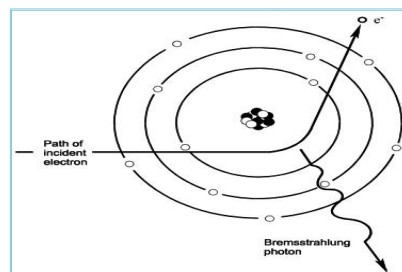
Gambar 2.4. Transisi elektron pada tiap kulit yang berbeda disertai emisi foton karakteristik

Tabel 2.1 Sinar-X Karakteristik Kulit-K dengan target Tungsten

Transition	Designation	Energy (keV)
K-L <sub>III</sub>	$\alpha_1$	59.321
K-L <sub>II</sub>	$\alpha_2$	57.984
K-M <sub>II</sub>	$\beta_3$	66.950
K-M <sub>III</sub>	$\beta_1$	67.244
K-M <sub>IV</sub>	$\beta_{5/1}$	67.654
K-M <sub>V</sub>	$\beta_{5/2}$	67.716
K-N <sub>II</sub>	$\beta_{2/1}$	69.033
K-N <sub>III</sub>	$\beta_{2/2}$	69.101
K-N <sub>IV</sub>	$\beta_{4/1}$	69.269
K-N <sub>V</sub>	$\beta_{4/2}$	69.283
K-O <sub>II</sub>	$\beta_{2/3}$	69.478
K-O <sub>III</sub>	$\beta_{2/4}$	69.489

### 2..1.2 Sinar X Bremstrahlung

Terjadinya sinar X bremstrahlung yaitu adanya elektron dengan kecepatan tinggi yang mengenai target anoda, elektron tersebut akan mengalami pelemahan oleh inti atom. Pelemahan elektron tersebut dikarenakan muatan dan massa inti atom yang relative lebih besar dibandingkan dengan elektron, sesuai dengan hukum kekekalan energy.



Gambar 2.5 Produksi Sinar X bremstrahlung

## 2.2 INTERAKSI RADIASI DENGAN MATERI

### 2.2.1 Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah keluarnya suatu elektron dari permukaan logam yang dikenai oleh seberkas cahaya dan menyerap radiasi elektromagnetik yang berada diatas frekuensi ambang yang tergantung pada jenis permukaan. Tidak ada elektron yang dilepaskan oleh radiasi dibawah frekuensi ambang, karena elektron tidak mendapatkan energi yang cukup untuk ikatan atom. Cahaya merupakan radiasi elektromagnetik. Jika cahaya yang frekuensinya cukup tinggi jatuh pada permukaan logam, maka logam tersebut akan memancarkan elektron. Peristiwa tersebut dinamakan dengan efek fotolistrik. Elektron dapat terlepas dari logam karena energi diserap dari gelombang elektromagnetik yang terlepas adalah :

$$E_k = hf - hf_0 \quad (2.1)$$

Dimana :  $W = hf_0$  (energi ambang)

$h$  = Konstanta Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s)

$f_0$  = Frekuensi ambang

$f$  = Frekuensi gelombang yang datang

Energi foton untuk massa diam ( $m = 0$ )

$$E = nhf \quad (2.2)$$

$$E = nh \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dimana :  $\lambda$  = Panjang gelombang cahaya (m)

$c$  = Kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

$f$  = Frekuensi cahaya

$E$  = Energi foton

$n$  = Jumlah Partikel

Momentum partikel tak bermassa berkaitan dengan energi yang menurut rumus

$$E = pc \quad (2.4)$$

Karena energi foton ialah  $hf$  maka momentumnya ialah :

$$P = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2.5)$$

### 2.2.2 Efek Compton

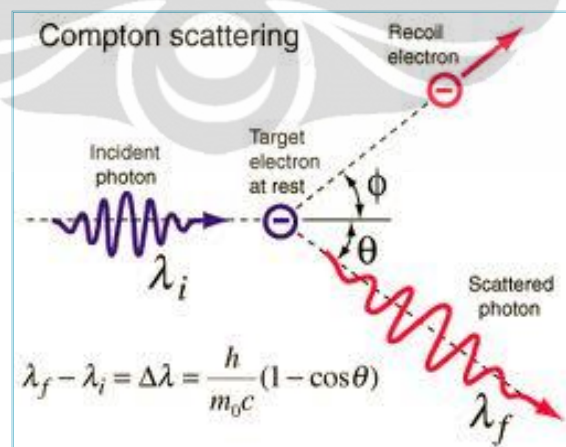
Hamburan Compton terjadi karena adanya radiasi yang dihamburkan oleh elektron bebas yang tidak terikat pada atom. Sebagian energi radiasi diberikan kepada elektron. Elektron tersebut dilepaskan dari ikatan inti atom, sisa energi lainnya diradiasikan kembali sebagai radiasi elektromagnetik. Dalam hamburan Compton ini, energi foton yang datang yang diserap atom diubah menjadi energi kinetik elektron dan foton hamburan. Perubahan panjang gelombang foton hamburan dari  $\lambda$  menjadi  $\lambda'$  dirumuskan :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (2.6)$$

dengan memasukkan nilai-nilai  $h$ ,  $m$  dan  $c$  diperoleh

$$\Delta\lambda (\text{A}) = 0.0242 (1 - \cos \theta) \quad (2.7)$$

Hamburan foton penting untuk radiasi elektromagnetik dengan energi 200 keV hingga 5 MeV dalam sebagian besar unsur-unsur ringan.



\*<http://illumina.usc.edu/article.php?articleID=170&page=2>

**Gambar 2.6** Proses terjadinya Hamburan Compton

## 2.3 Alat Ukur Radiasi

### 2.3.1 Detektor CdTe

Sebuah detektor CdTe memiliki ketebalan 1 mm (Amptek XR – 100T – CdTe). Ukuran CdTe adalah  $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$  atau  $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ , dan memiliki densitas  $5.85 \text{ g/cm}^3$ . Detektor CdTe memiliki elektroda schottky pada CdTe yang terbuat dari Platinum (Pt, katoda) dan Indium (In, anoda) pada bentuk permukaan In/p-type pembatas schottky. Sebuah Pembatas schottky cukup tinggi untuk menghasilkan hole, yang merupakan pembawa utama pada p-type semikonduktor ke p-type kristal CdTe. Sehingga kebocoran arus yang terjadi pada detektor CdTe jauh lebih rendah dengan hubungan schottky dibandingkan dengan ohmik.

### 2.3.2 Teori Operasi

Sinar X dan sinar Gamma berinteraksi dengan atom CdTe menghasilkan hilangnya suatu energi rata – rata sekitar 4.43 eV pada satu elektron atau hole dalam CdTe. Tergantung dari energi yang masuk, kehilangan suatu energi ini dikarenakan adanya efek fotolistrik atau hamburan Compton. Probabilitas atau efisiensi pada detektor untuk menghentikan radiasi yang masuk dan menghasilkan elektron atau sepasang hole dengan meningkatkan atau menambahkan ketebalan CdTe.

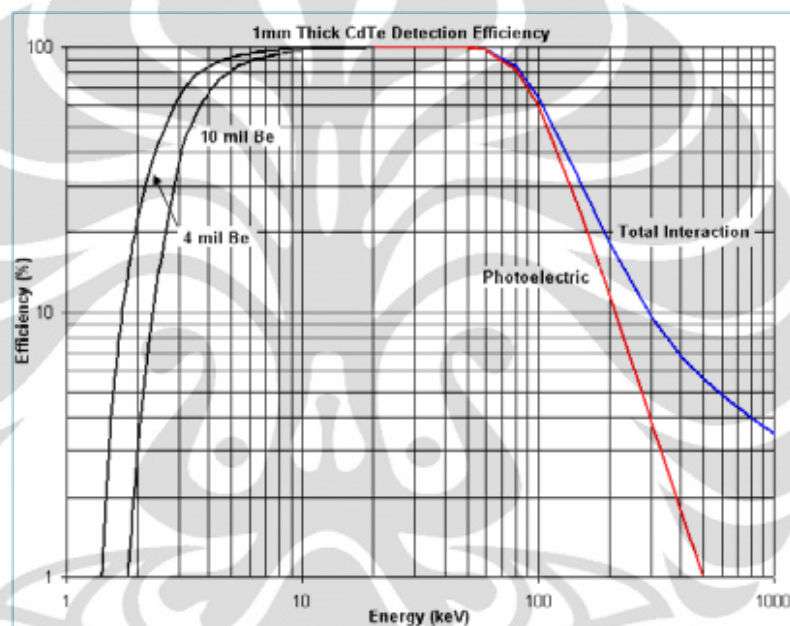
Untuk memudahkan proses pengumpulan elektron atau hole pada detektor CdTe, menggunakan tegangan potensial sebesar 500 V. Tegangan yang digunakan ini terlalu tinggi untuk operasi pada temperatur kamar, akan menyebabkan terjadinya kebocoran arus yang berlebihan, dan akan cepat mengalami kerusakan. Ketika detektor pada XR -100T – CdTe didinginkan, kebocoran arus yang terjadi akan berkurang, sehingga tegangan bias yang terjadi cukup tinggi.

Alat pendingin termoelektrik mendinginkan detektor CdTe dan transistor input FET dengan preamplifier sensitive. Pendingin FET dapat mengurangi



kebocoran arus dan meningkatkan transkonduktansi, untuk mengurangi kebisingan pada system elektronik.

Sebuah sensor temperature diletakkan pada pendingin substrat untuk memberikan penunjukkan bacaan temperatur pada komponen internal yang diperoleh dibawah 10°C dan tidak mempengaruhi XR – 100T – CdTe dengan beberapa variasi derajat pada temperature. Oleh karena itu, temperatur pengendalian suhu yang tidak akurat diperlukan ketika menggunakan XR – 100T – CdTe.



Gambar 2.7 ketebalan 1mm efisiensi detektor CdTe

### 2.3.3 Efisiensi Detektor

Sistem detektor XR – 100T – CdTe memiliki kinerja sinar X dan sinar gamma yang cukup tinggi. Detektor CdTe menggantikan dioda Si yang digunakan pada XR 100 dengan CdTe. Keuntungan utama dari CdTe adalah memiliki efisiensi jauh lebih besar, karena memiliki nomor atom atom Z yang lebih tinggi. Efisiensi detektor pada amptek 500  $\mu\text{m}$  mulai dari 10 keV. pada 1 mm CdTe, efisiensi menjadi tinggi hingga 100 keV. Ketika seberkas foton sinar X atau sinar gamma melewati sebuah material, hasilnya adalah sebuah attenuasi eksponensial dari sinar utama. Setiap proses interaksi dapat dikarakterisasi dengan

adanya panjang lintasan pada absorber. Jumlah probabilitas dari sinar foton yang dihilangkan merupakan sebagai koefisien attenuasi linear yang dilambangkan dengan  $\mu$ .

$$I=I_0e^{-\mu t} \quad (2.8)$$

Dimana  $I_0$  merupakan fluk foton yang datang,  $t$  adalah ketebalan dari attenuator,  $\mu$  adalah koefisien attenuasi linear dan  $I$  merupakan fluk foton primer yang ditransmisikan. Jumlah foton primer dan ketebalan dari attenuator saling berinteraksi.

$$I_{in}=I_0(1-e^{-\mu t}) \quad (2.9)$$

Koefisien attenuasi linear tergantung pada mekanisme interaksi pada energi attenuasi. Koefisien massa attenuasi yaitu  $\mu_m = \mu / p$ .  $p$  merupakan densitas pada medium. Ada beberapa proses yang berbeda di mana foton berinteraksi. Dalam rentang energi yang sering di ukur detektor XR 100 T proses yang paling penting adalah interaksi fotolistrik seluruh energi foton yang datang semua di simpan dalam detektor, sedangkan dalam hamburan Compton hanya sebagian saja energi yang di simpan dalam detektor.

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

Program Xcomp5r merupakan pemrograman yang di gunakan untuk mendapatkan spektrum Sinar X hasil pendekatan empiris. Xcomp5r berbasis pengoperasian DOS. Xcomp5r dapat menentukan spektrum energi Sinar x dalam rentang antara tegangan tabung 20 kV-150 kV dengan interval 1 keV.

## BAB III METODE PENELITIAN

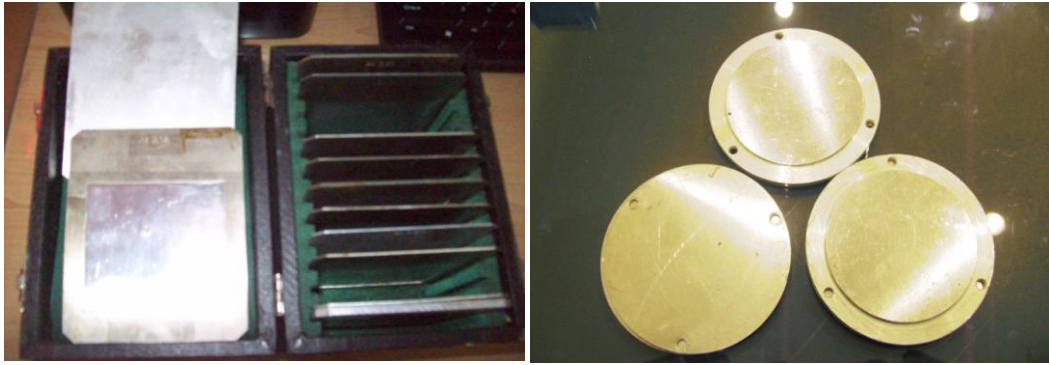
### 3.1 PEMODELAN ALAT DAN BAHAN

Penggunaan alat ukur radiasi dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu untuk kegiatan proteksi radiasi dan untuk kegiatan aplikasi atau penelitian radiasi nuklir. Alat ukur radiasi yang digunakan untuk kegiatan proteksi radiasi dapat menunjukkan nilai intensitas atau dosis radiasi yang mengenai alat tersebut. Sedangkan alat ukur yang digunakan di bidang aplikasi radiasi dan penelitian biasanya digunakan untuk menampilkan nilai kuantitas radiasi atau spektrum. Setiap alat ukur radiasi terdiri dari dua bagian utama yaitu detektor dan peralatan penunjang. Detektor merupakan suatu bahan yang peka terhadap radiasi akan menghasilkan suatu respon. Peralatan penunjang berfungsi untuk mengubah tanggapan detektor tersebut menjadi suatu informasi yang dapat diamati.

Dilakukan pemodelan pada tabung sinar X, sinar X yang digunakan adalah YXYLON YTU – 320 DO3 terlihat pada gambar 3.1. Terdapat beberapa komponen penunjang seperti detektor CdTe, kolimator, monitor pengontrol sinar X, dan filter tambahan.



**Gambar 3.1 a.** Pesawat Sinar X Y.TU 320 D-302. **b** Pengontrol Pesawat Sinar X.



**Gambar 3.2** Added Filter dengan berbagai ketebalan.



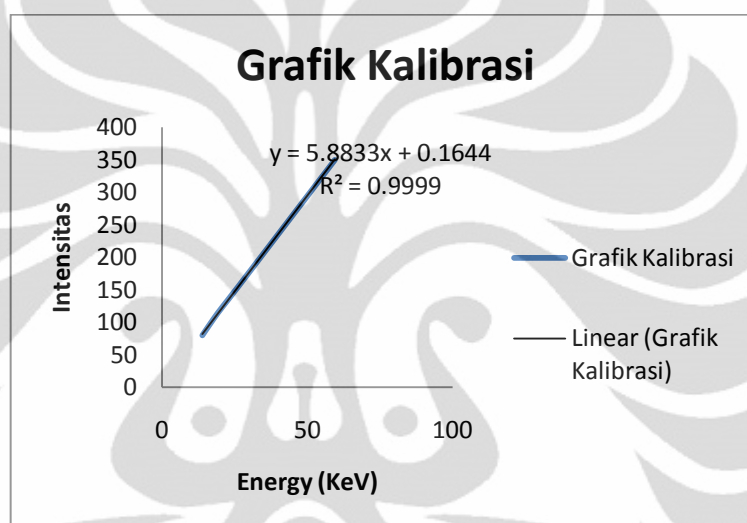
**Gambar 3.3** Detektor CdTe dan kolimator

### 3.2 PENGUKURAN SPEKTRUM SINAR X

Pengambilan data spektrum energi Sinar X adalah dengan cara mempersiapkan detektor XR-100T CdTe terlebih dahulu dengan menempatkan 100 cm dari Focal Spot. Jarak antara Focal Spot dengan rumah Filter sebesar 50 cm dan jarak antara rumah filter dengan detektor XR-100T CdTe sebesar 50 cm, sehingga jarak antara Focal Spot dengan Detektor XR-100T CdTe sebesar 100 cm. kemudian kabel – kabel yang digunakan di hubungkan ke komputer menggunakan kabel USB yang berada di luar ruangan pesawat Sinar X. Dimana pada saat melakukan pengambilan data, detektor XR-100T CdTe terlebih dahulu dilakukan kalibrasi. Detektor XR-100T CdTe yang sudah terkalibrasi sesuai dengan persamaan kurva kalibrasi pada gambar 3.4, dengan tabel data kalibrasi terdapat pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Data kalibrasi detektor XR-100T CdTe

Channel	Energy ( KeV )
80.01	13.9
105.58	17.8
123.71	20.8
155.58	26.345
350.09	59.537

**Gambar 3.4** grafik kalibrasi detektor

Peralatan yang dibutuhkan dalam pengambilan data eksperimen ini tidak hanya menggunakan XR-100T CdTe, lainnya yaitu kolimator yang di dalamnya telah di masukkan Brass Spacer sebanyak tiga buah dan piringan kolimator yang memiliki ketebalan 2 mm berdiameter sebesar 100  $\mu\text{m}$ . Beberapa lempengan Aluminium sebagai Added Filter terdapat pada gambar 3.3. Setelah peralatan yang di butuhkan selesai terpasang maka langkah selanjutnya adalah mengaktifkan software ADMCA yang di hubungkan ke komputer yang berada di luar ruangan pesawat Sinar X. Ketika semua peralatan sudah terpasang degan baik baik alat dengan software dikomputer, dapat langsung dilakukan pengambilan data. Pengambilan data di ulang sampai tiga kali dengan cacahan mencapai sepuluh ribu. Dengan mengatur tegangan arus sebesar 0.5 mA kemudian di pasang Added Filter sesuai tegangan yang di berikan tabel 3.2. Pengukuran dilakukan

dengan tegangan tabung sebesar 40kV, 50kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100, kV, 120 kV dan 150 kV.

**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
RQR 5	70	2.58	2.83
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

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Pengukuran Spektrum Sinar X dengan detektor CdTe**

Semua pengukuran dilakukan dengan waktu penyinaran yang berbeda sampai diperoleh bentuk kurva yang tidak terlalu fluktuatif dan intensitas yang cukup, lama penyinaran tergantung tegangan pada tabung yang digunakan. Karena intensitas yang akan terukur oleh detektor untuk masing – masing tegangan berbeda. Contohnya tegangan 40 kV yang lama pengukurannya melebihi dua puluh menit untuk menghasilkan cacahan sampai sepuluh ribu. Sedangkan pada tegangan 100 kV waktu yang dibutuhkan hanya beberapa menit untuk menghasilkan sepuluh ribu cacahan. Hasil pengukuran spektrum sinar X dapat dilihat pada gambar 4.1, dan hasil pengukuran pada semua tegangan dapat dilihat pada lampiran.

Dari hasil Pengukuran spektrum sinar X, dapat diketahui karakteristik detektor CdTe dengan ditandai adanya beberapa spektrum yang selalu muncul disetiap pengukuran pada semua tegangan kerja. Berdasarkan data spesifikasi detektor CdTe diketahui telah terjadi proses "escape elektron" yang terjadi ketika radiasi yang menumbuk materi detektor, telah terjadi proses pelepasan elektron pada atom Cd dan Te, dan elektron tersebut akan berinteraksi didalam detektor sehingga terdeteksi menjadi peak pada energi sekitar 10keV seperti terlihat pada gambar 4.1 dan lampiran bagian 1. Selain itu juga terlihat dengan jelas sinar X karakteristik dari Cd dan Te, berdasarkan spesifikasi detektor kurva karakteristik terjadi pada beberapa puncak energi seperti ditampilkan pada tabel 4.1.

Gambar 4.1.a menunjukkan spektrum sinar-X karakteristik dari tabung diukur dengan detektor XR100T-CdTe. Masing – masing tepi K dari karakteristik Cd dan Te diatas adalah 25.81 dan 29.21 keV, hasil spektrum akan naik pertama kali pada energi terendah sebesar 8.81keV. Spektrum ini menjelaskan terjadinya proses penyerapan energi rendah didalam detektor. Pada saat terjadi proses sinar X karakteristik terjadi transisi elektron ke tingkat yang lebih rendah dan

memancarkan sinar X karakteristik di salah satu energi seperti ditunjukkan pada tabel 4.1.

Table 4.1. Energi K edge dan karakteristik sinar X pada Cd dan Te\*.

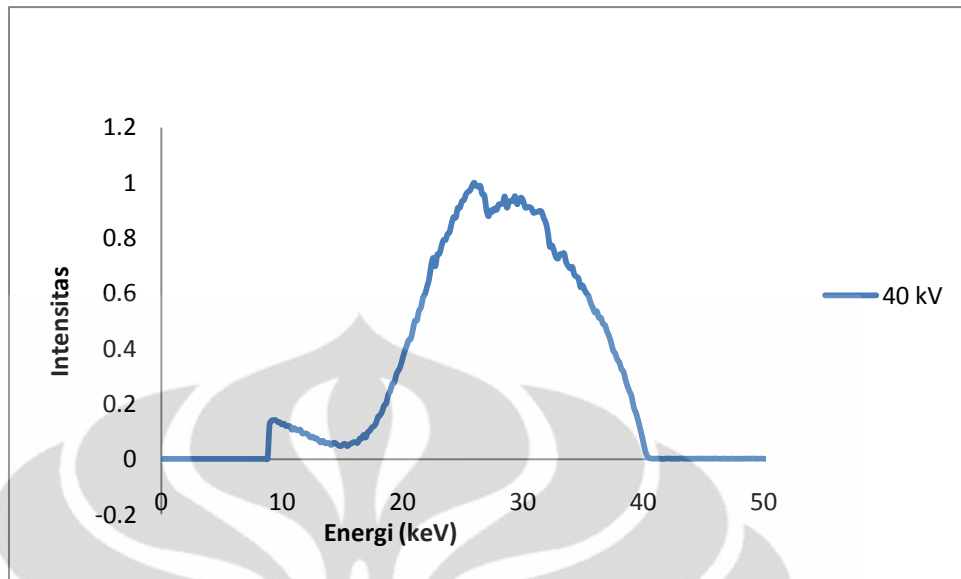
Element	K edge	Ka1	Ka2	Kb1	Kb2
Cd	26.704	22.982	23.172	26.093	26.641
Te	31.800	27.200	27.471	30.993	31.698

Dari hasil spektrum yang terukur dapat diketahui karakteristik CdTe, dari gambar spektrum tersebut diketahui sinar X karakteristik dari kedua atom Cd dan Te dengan nilai yang dihasilkan dari setiap spektrum pengukuran kemudian dicocokkan dengan tabel energi K karakteristik Cd dan Te. Puncak dari setiap karakteristik CdTe memiliki energi yang sama pada saat pertama kali naik. Dari hasil pengukuran tidak hanya karakteristik detektor CdTe yang diperoleh, akan tetapi karakteristik sinar X dari tabung juga dapat terlihat. Pada energi 40 kV, spektrum karakteristik sinar X dari tabung belum terlihat dengan jelas. Hal tersebut disebabkan karena belum cukupnya energy yang dihasilkan dari interaksi antara tabung sinar X dan detektornya. Pada grafik 80 kV, sinar X karakteristik dari tabung tersebut baru muncul, seperti terlihat pada lampiran 1 pada pengukuran tegangan diatas 80kV.

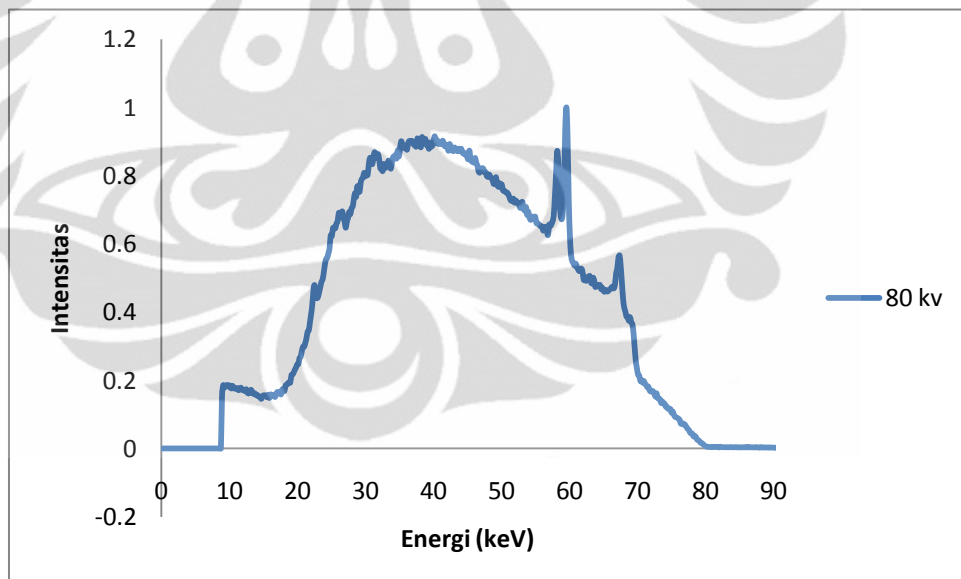
Gambar grafik 4.2, merupakan hasil pengukuran spektrum sinar X dengan detektor CdTe, dari grafik tersebut dapat terlihat karakteristik CdTe dan karakteristik dari tabung sinar X. Puncak energi yang terdapat pada tegangan 80kV ini sebesar 79.68keV, terdapat tiga puncak sinar X karakteristik dari target sinar X yaitu tungsten dengan energi sebesar 58.10keV, 59.46keV, dan 67.28keV.

Dari semua hasil pengukuran diperoleh pola spektrum yang selalu muncul, daerah tersebut merupakan karakteristik dari detektor CdTe dan posisi energi berada pada daerah energi K edge dan sinar X karakteristik dari detektor Cd dan Te.





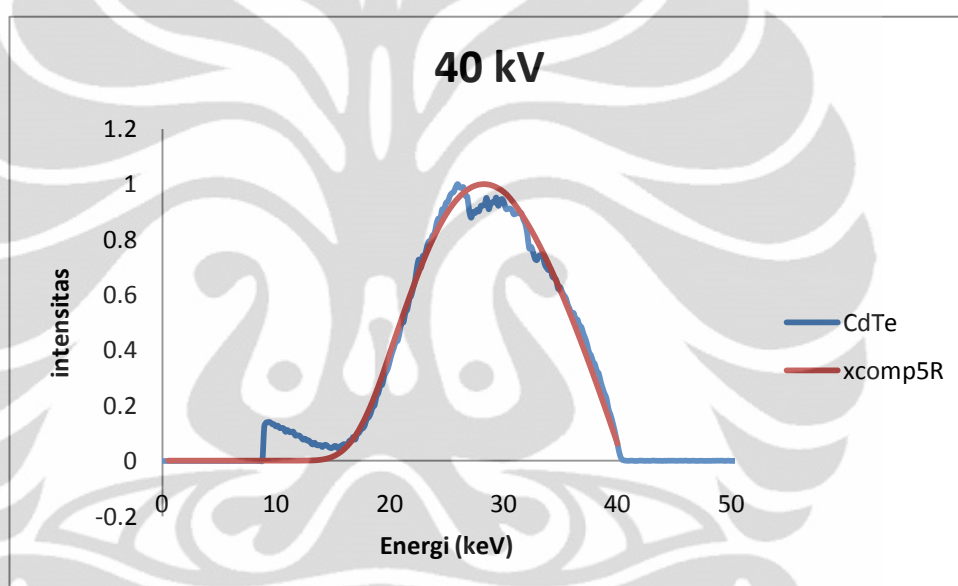
Gambar 4.1. Pengukuran Spektrum sinar X tegangan 40 kV, dengan detektor CdTe



Gambar 4.2 Pengukuran Spektrum sinar X tegangan 80 kV, dengan detektor CdTe

## 4.2 Perbandingan Spektrum Sinar X detektor CdTe dengan Xcomp5R

Program xcomp5r merupakan kode komputer yang dapat digunakan untuk mendapatkan spektrum sinar-X di udara dan Program xcomp5r digunakan sebagai data pembanding. Hasil perbandingan antara spektrum sinar X dengan CdTe dengan penggabungan program xcomp5R dapat dilihat dari gambar 4.3 dan lampiran 2. Xcomp5R merupakan program yang bekerja pada udara, sedangkan CdTe digunakan sebagai bahan detektor.



Gambar 4.3 Gabungan Spektrum CdTe dengan xcomp5r, dengan tegangan 40 kV

Dari gabungan grafik antara spektrum yang dihasilkan dengan CdTe atau diaplikasikan ke xcomp5r, dapat terlihat adanya perubahan garis spektrum, dimana spektrum dari CdTe sedikit berbeda dengan spektrum dari xcomp5r. Pada xcomp5r tidak memiliki energi terendah seperti yang dihasilkan oleh spektrum CdTe. Hal ini terjadi karena pada spektrum yang diperoleh dari CdTe merupakan hasil interaksi sinar X dengan materi detektor Cd dan Te.

Berdasarkan perbandingan kurva pada semua energi terlihat jelas perbedaan yang signifikan pada beberapa energi, hal ini menunjukkan bahwa pada daerah tersebut terjadi interaksi antara sinar X dengan materi detektor, sehingga hasil pengukuran yang diperoleh merupakan hasil interaksi detektor dengan sinar X, bukan spektrum diudara. Jika spektrum CdTe ingin diubah menjadi spektrum diudara maka diperlukan konversi atau koreksi seperti teknik "unfolding".

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 KESIMPULAN**

- Berdasarkan perbandingan spektrum pengukuran dan spektrum perhitungan XCOMP5R, diketahui bahwa spektrum terukur merupakan spektrum hasil interaksi antara materi detektor dengan sinar X dan bukan spektrum di udara.
- Dari hasil pengukuran terlihat puncak yang selalu muncul pada setiap tegangan kerja dan puncak tersebut merupakan karakteristik dari detektor CdTe, yang merupakan hasil interaksi antara sinar X dengan detektor CdTe
- Karakteristik detektor yang muncul pada saat pengukuran adalah energy K edge dan sinar X karakteristik Cd dan Te yaitu Cd nilai K edge 26.704 keV, ka1 22.982 keV, ka2 23.172 keV, kb1 26.093 keV, kb2 26.641 keV. Te nilai K edge 31.800 keV, Ka1 27.200 keV, Ka2 27.471 keV, Kb1 30.993 keV, Kb2 31.698 keV.
- Dari hasil pengukuran dapat mencari hubungan antara sinar X dengan XCOMP5R untuk mengetahui karakteristik dari detektor, dengan asumsi spektrum XCOMP5R sebagai spektrum ideal.

#### **5.2 SARAN**

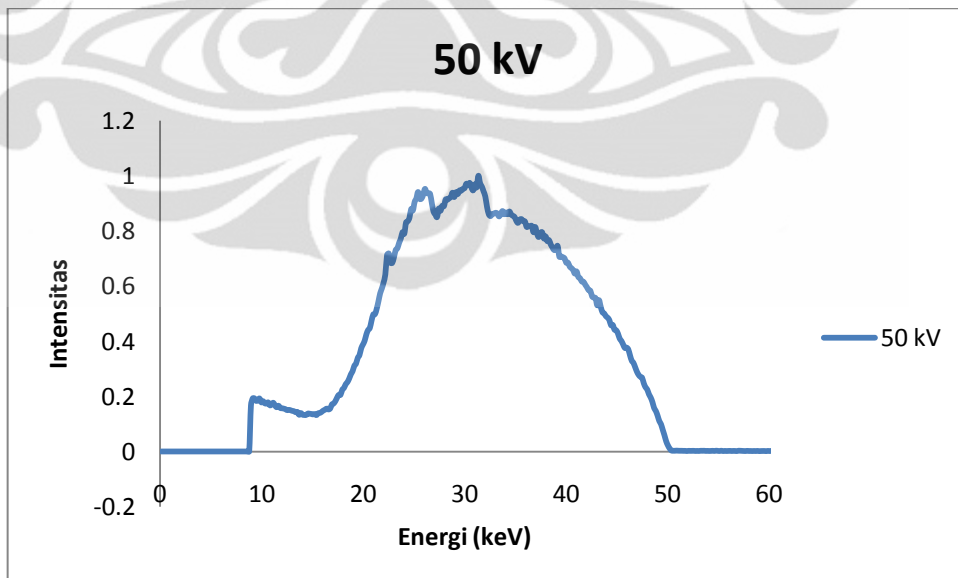
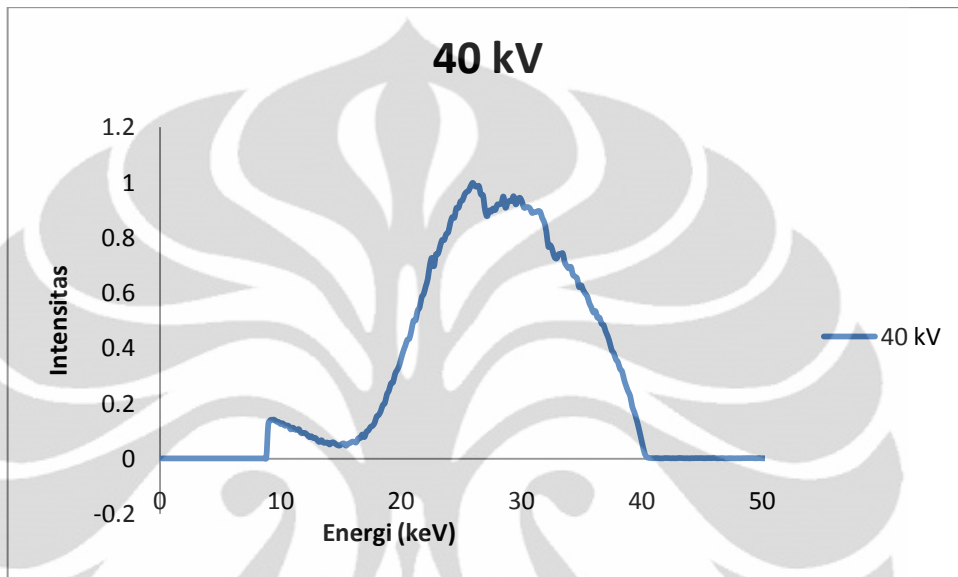
Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pemodelan secara terperinci antara pesawat sinar X beserta komponen penunjangnya, agar hasil pengukuran yang diperoleh lebih optimal lagi. Diperlukan waktu yang lebih lama dalam melakukan pengukuran, untuk mendapatkan hasil spektrum sinar X yang lebih bagus dari penelitian ini.

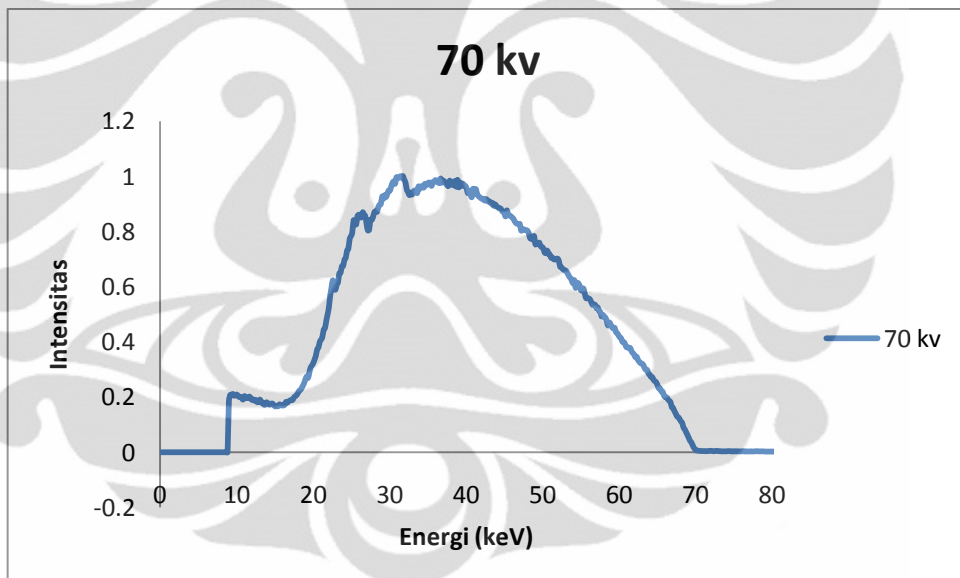
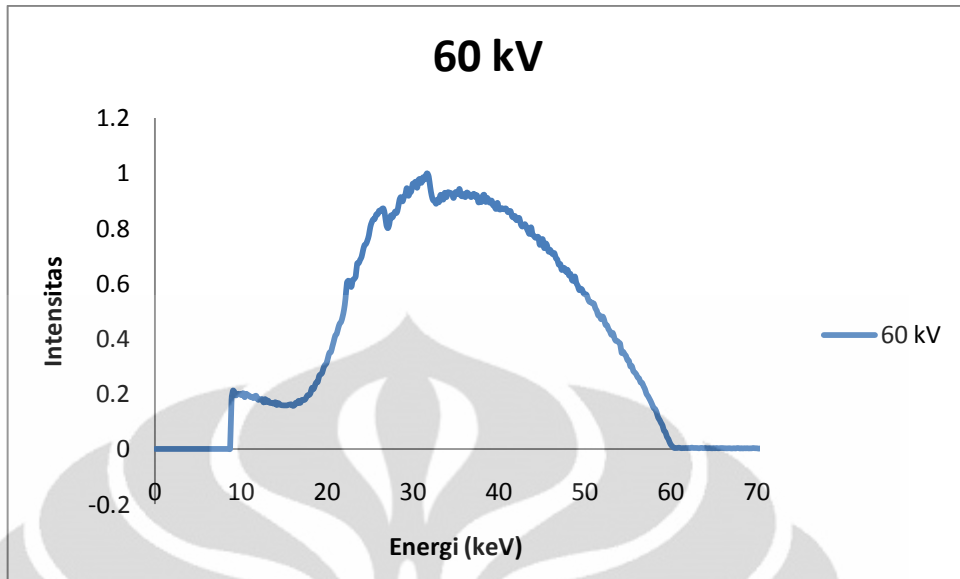
## DAFTAR ACUAN

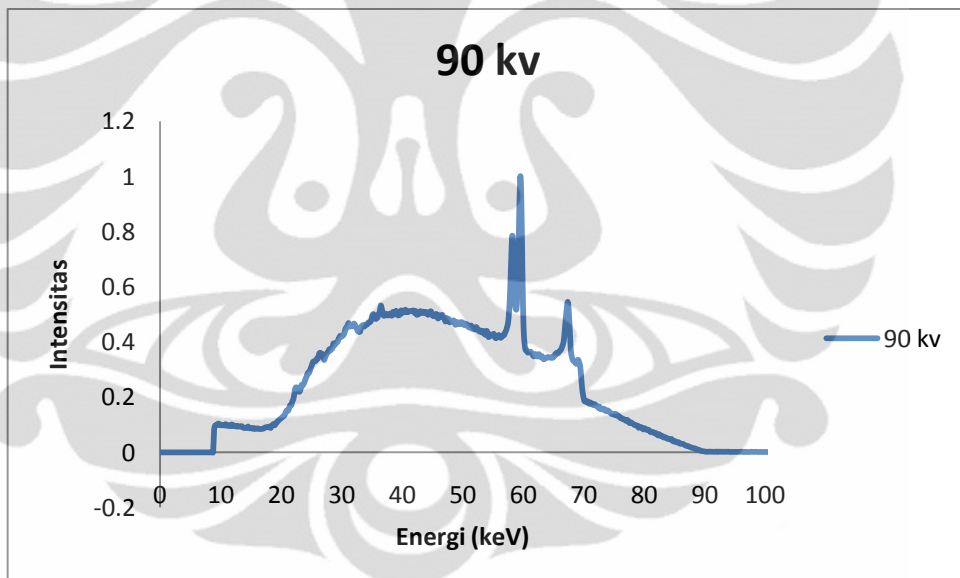
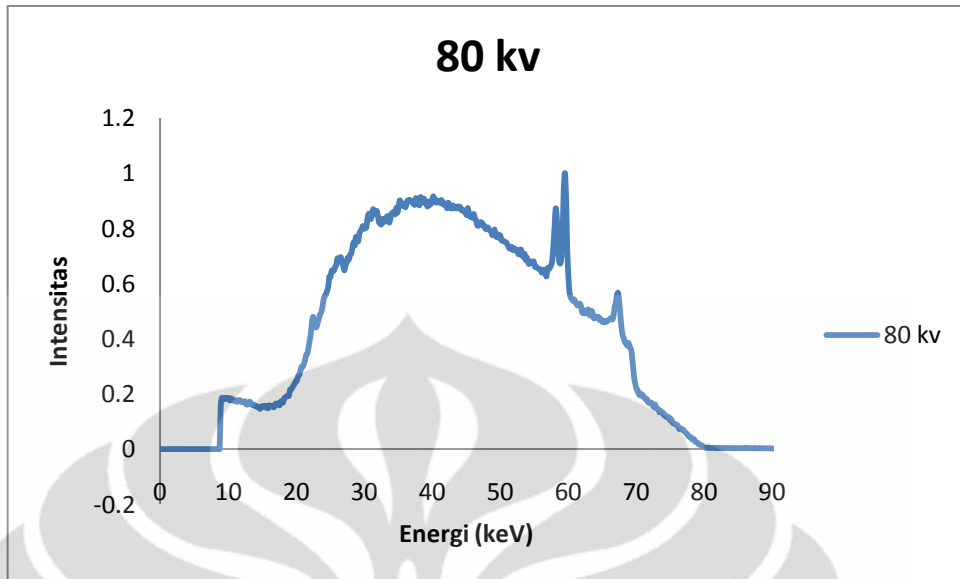
- Attix F.H., (2004). Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry. Wiley – Vch Verlag GmbH & Co.KGa, A Weinhelm
- Satoshi Miyajimaa “Thin CdTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy” Med. Phys. 30, 565-0871. 2003.
- See R. Jenkins, R.W. Gould, D. Gedcke, The Interaction of X-rays with Matter, Chapter 1 in Quantitative X-Ray Spectrometry, 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc., 1995.
- Technical Reports Series No.457. Dosimetry In Diagnostic Radiology An International Code Of Practice. International Atomic Energy Agency. Vienna.2007.
- [www.amptek.com](http://www.amptek.com) 6 September 2010
- [www.amptek.com/pdf/ancdte001.pdf](http://www.amptek.com/pdf/ancdte001.pdf)
  - o ( Kamis, 30 Oktober 2010. Pukul 8:29 WIB )
- [www.amptek.com/pdf/anczt2.pdf](http://www.amptek.com/pdf/anczt2.pdf)
  - o (Kamis, 30 Oktober 2010. pukul 8:30 WIB )
- [www.amptek.com/pdf/cztapp1.pdf](http://www.amptek.com/pdf/cztapp1.pdf)
  - o ( Minggu, 20 juni 2010. Pukul 10:50 WIB)
- [www.amptek.com/pdf/xr100cdte.pdf](http://www.amptek.com/pdf/xr100cdte.pdf)
  - o ( Jumat, 25 Juni 2010. Pukul 7:34 WIB)

## LAMPIRAN

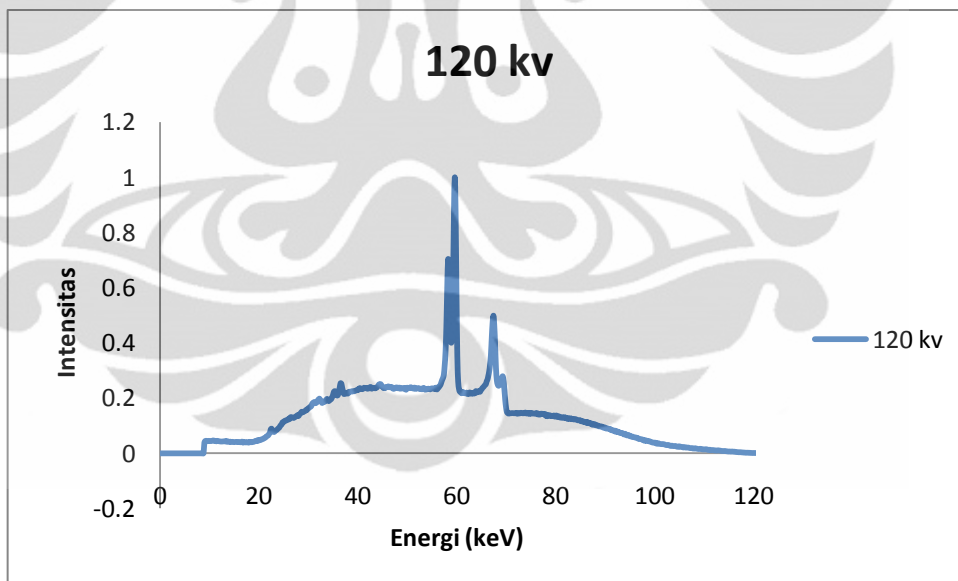
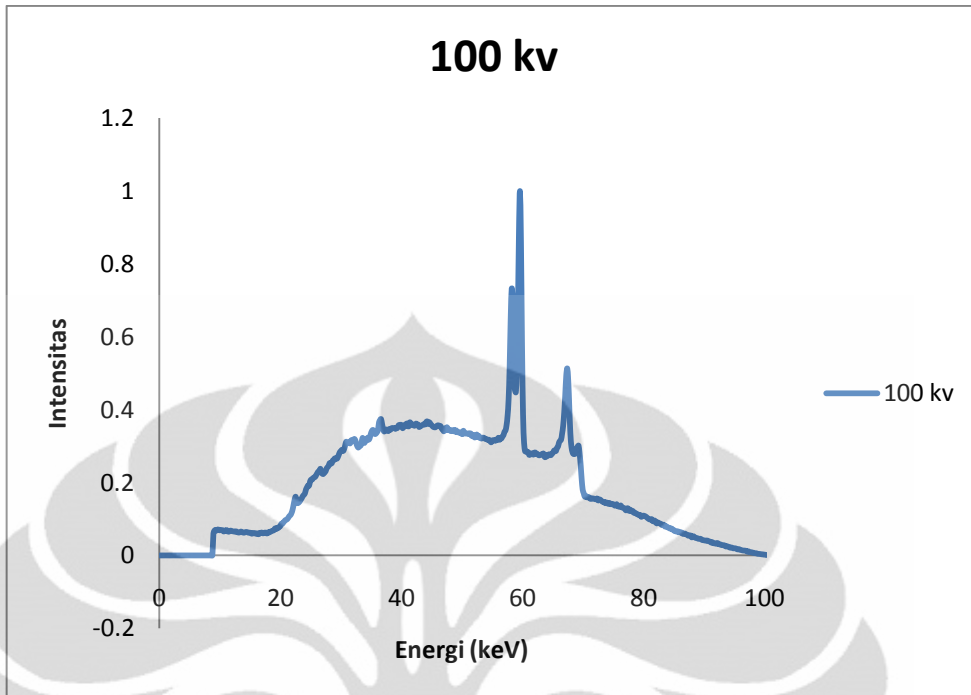
**Lampiran 1** : Kurva Spektrum Sinar-X dan detektor CdTe dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR

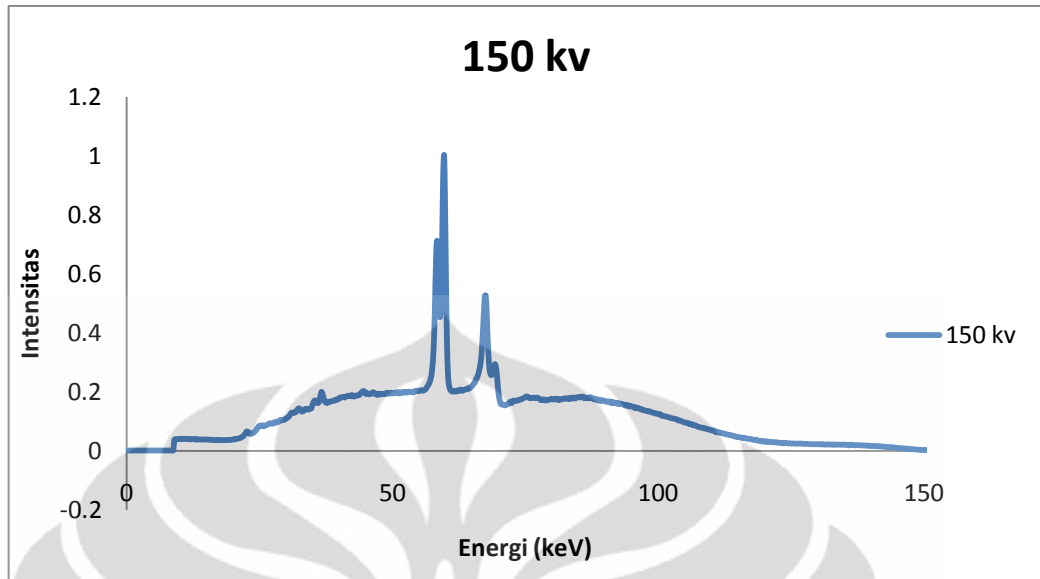




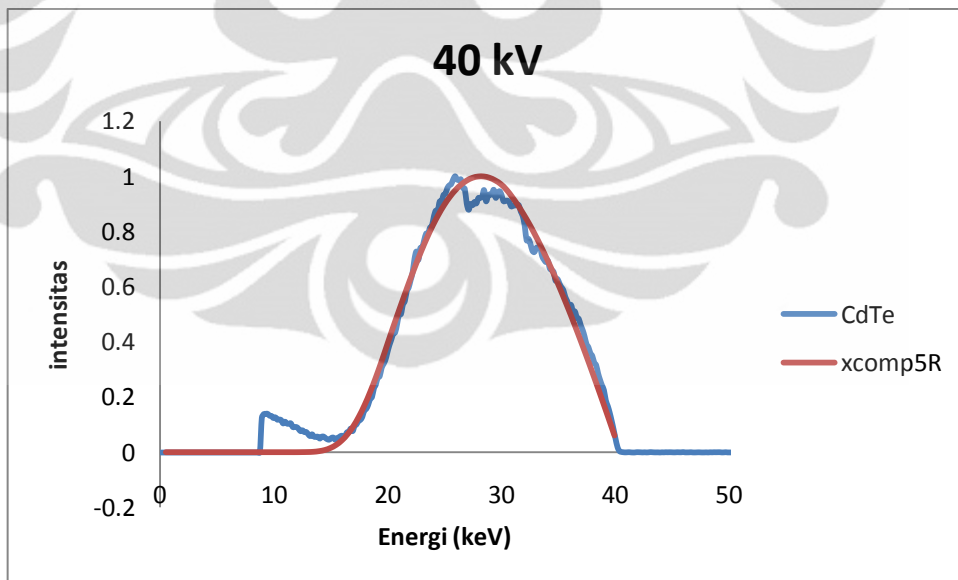


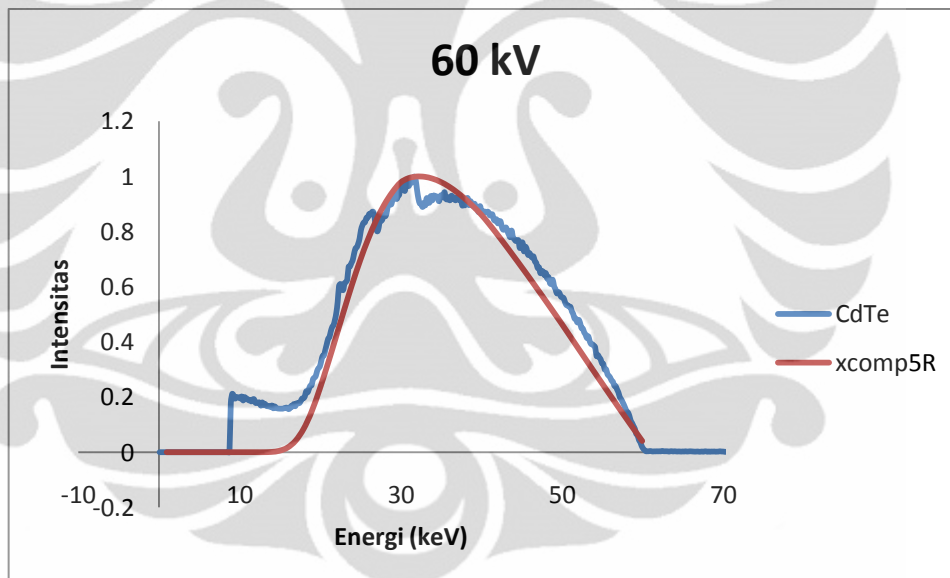
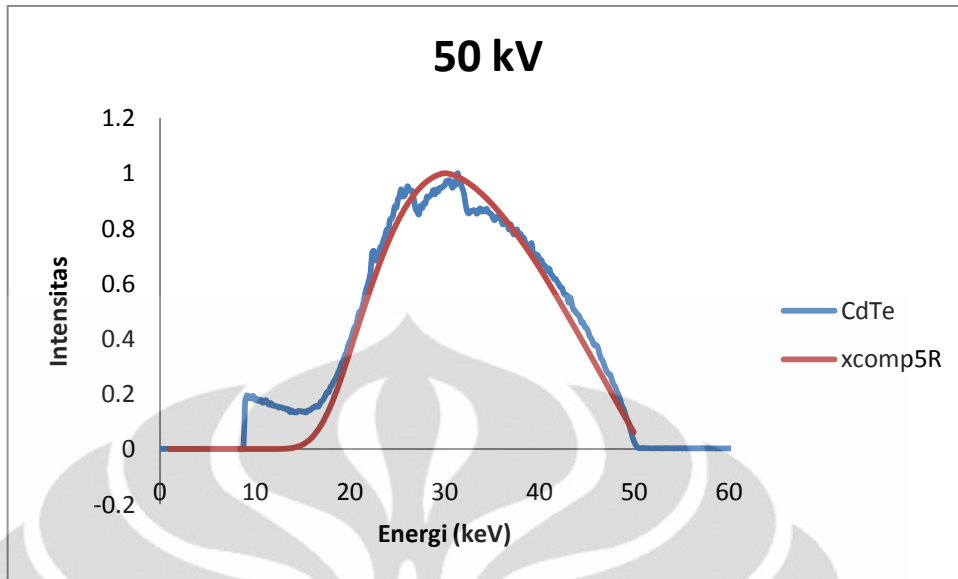


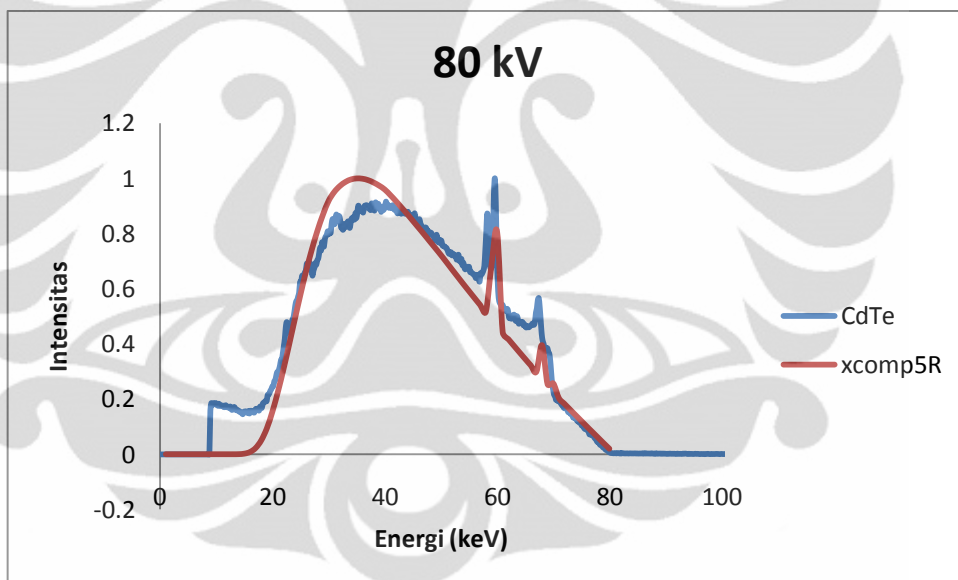
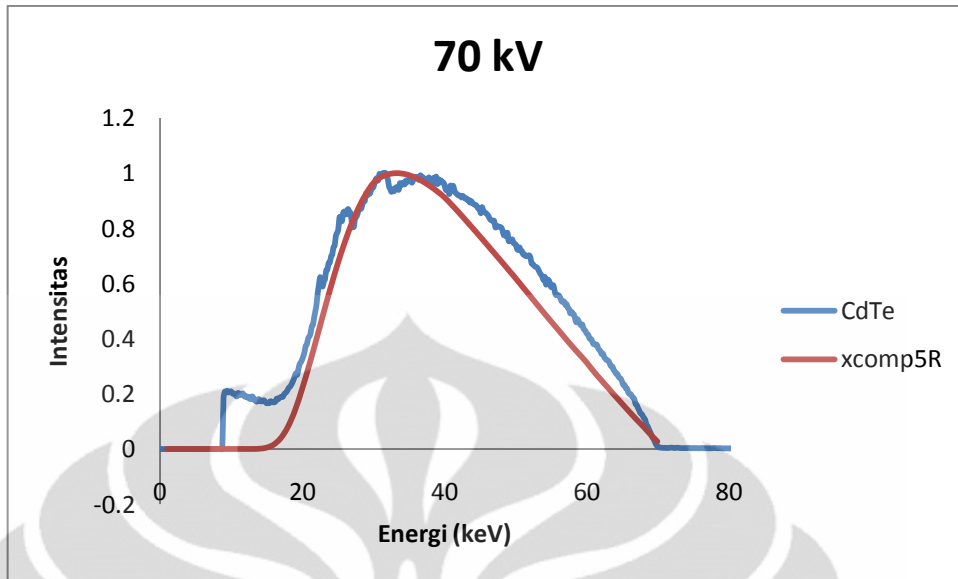


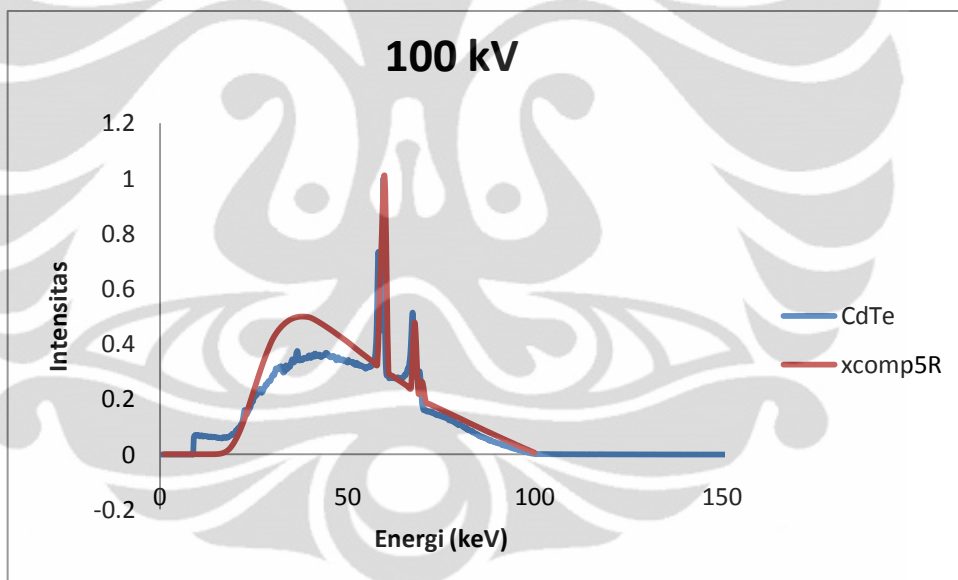
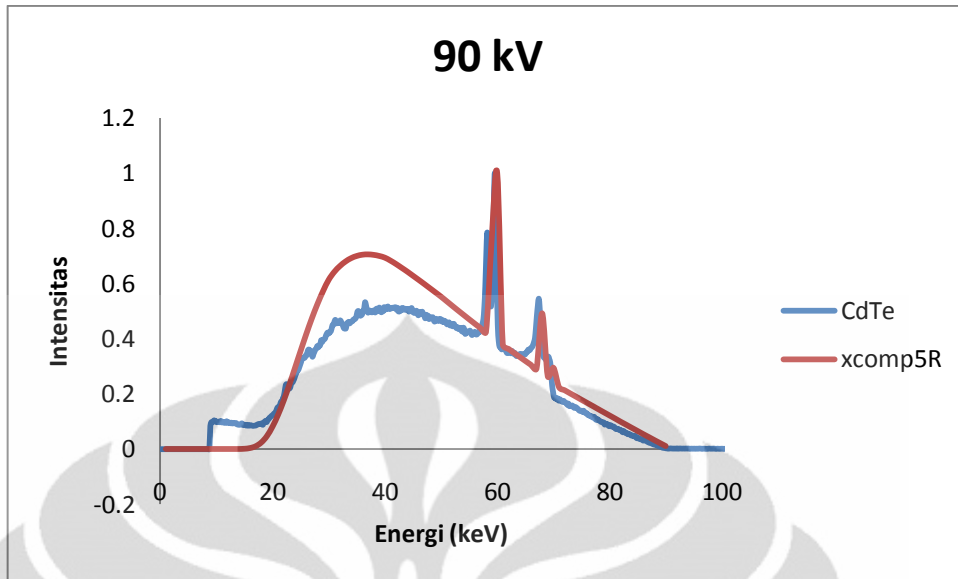


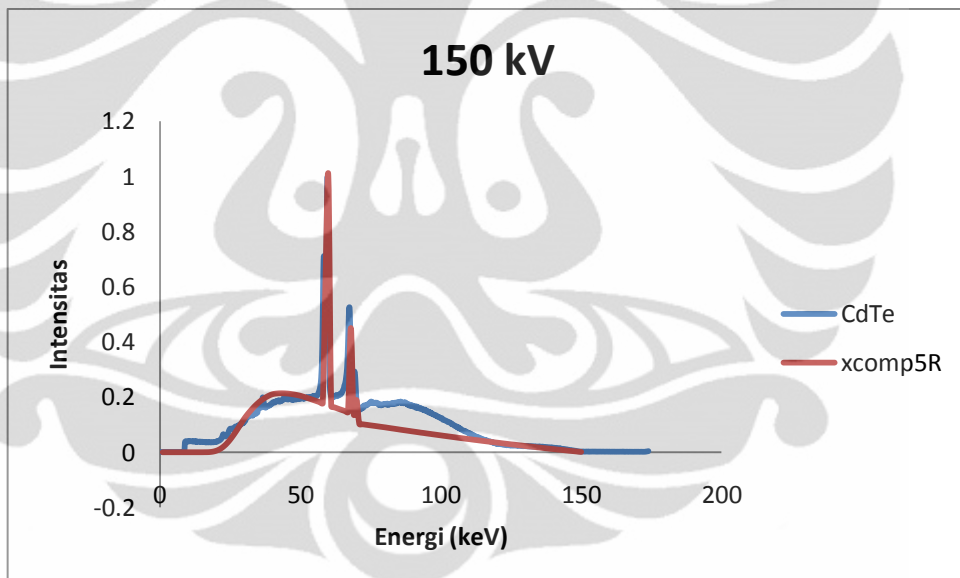
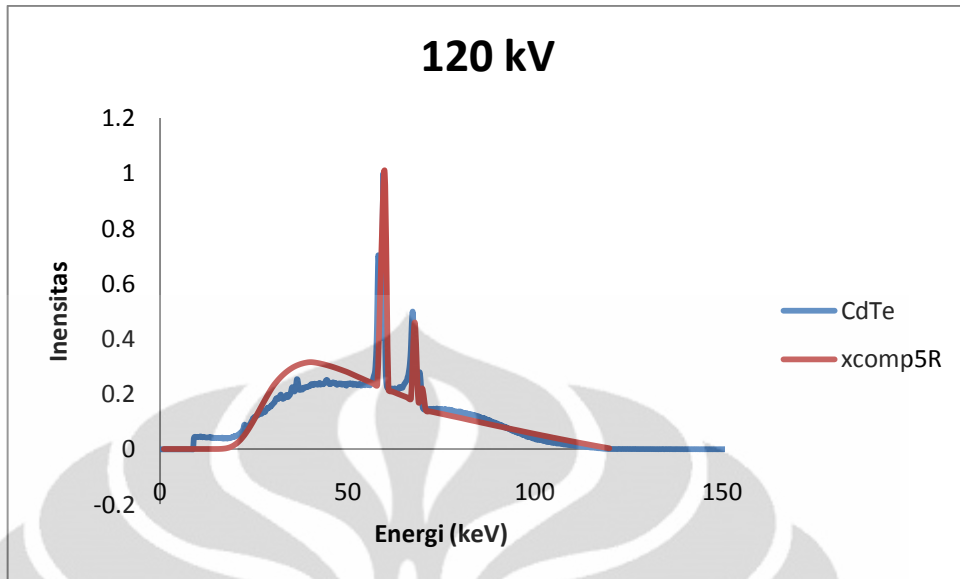
**Lampiran 2 :** Perbandingan Kurva Spektrum Sinar-X dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR



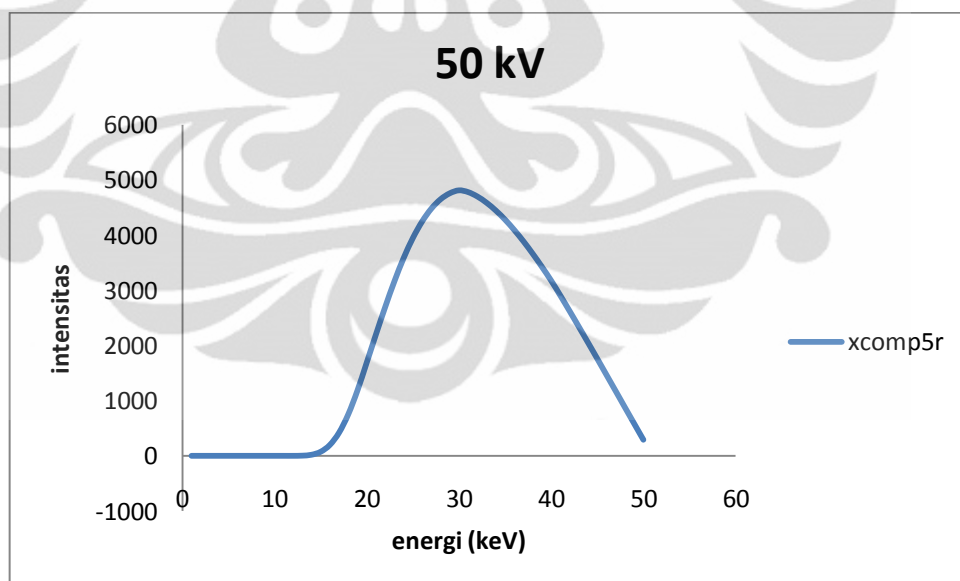
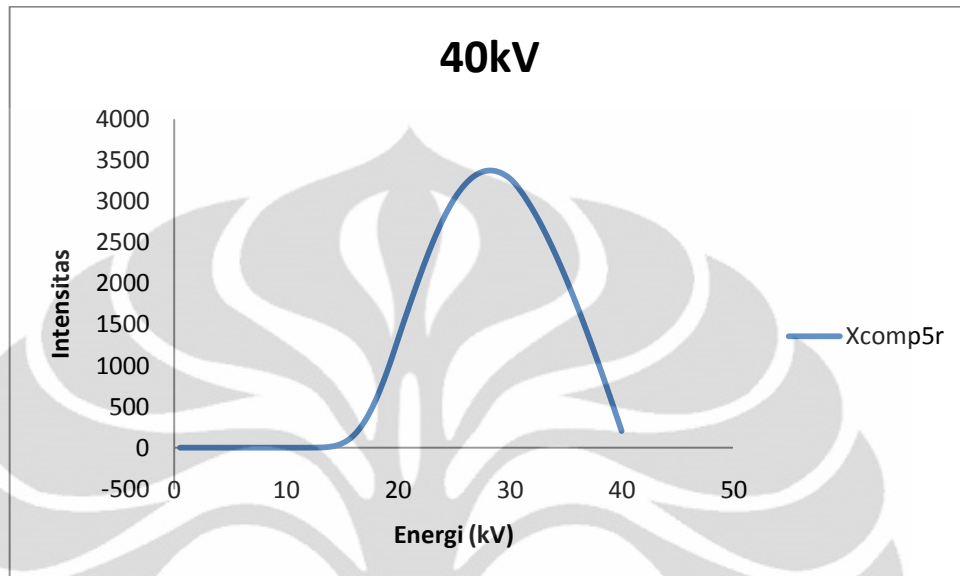


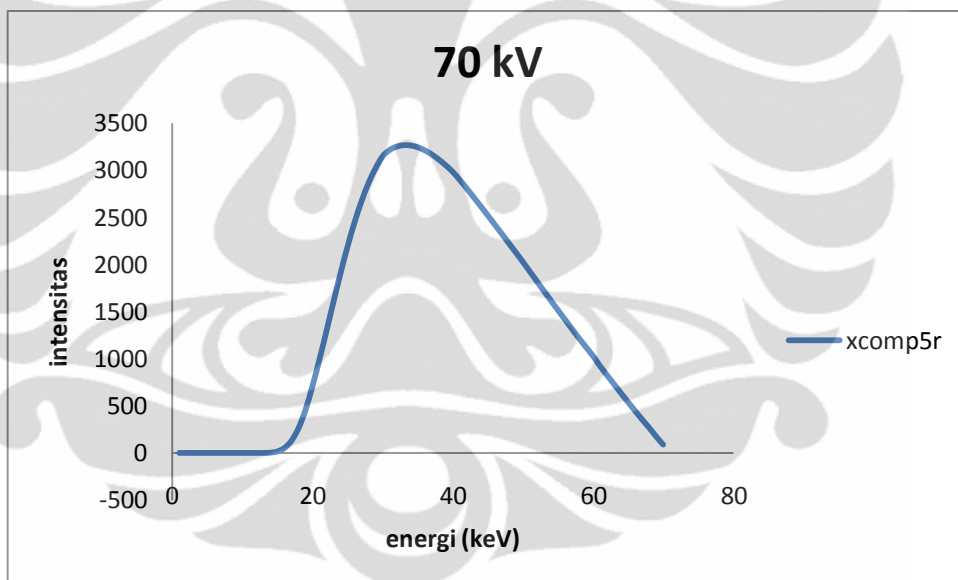
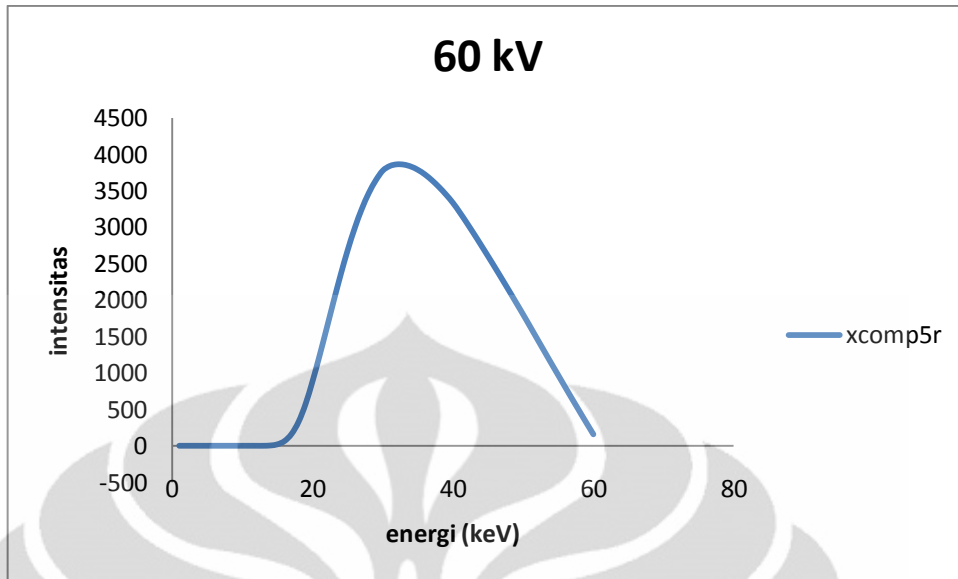




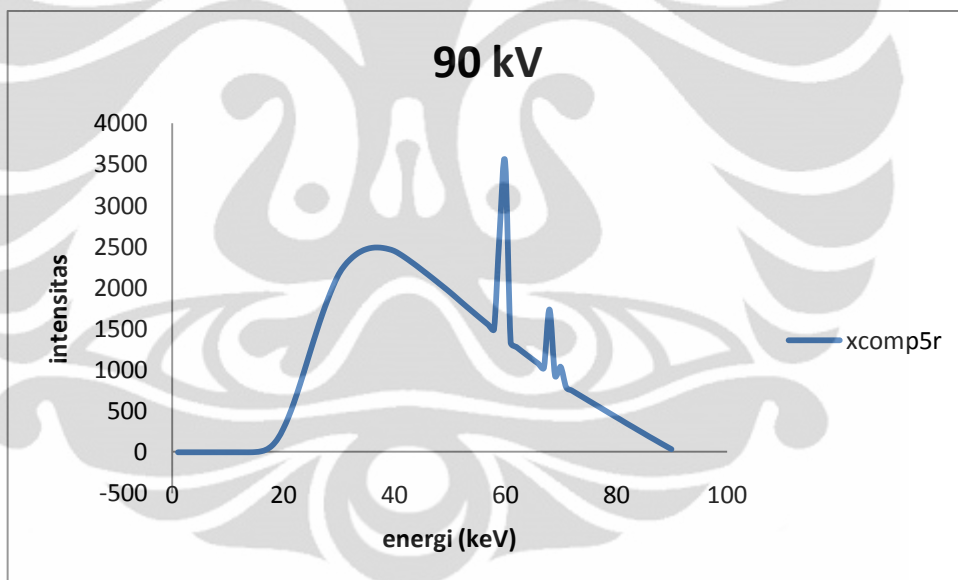
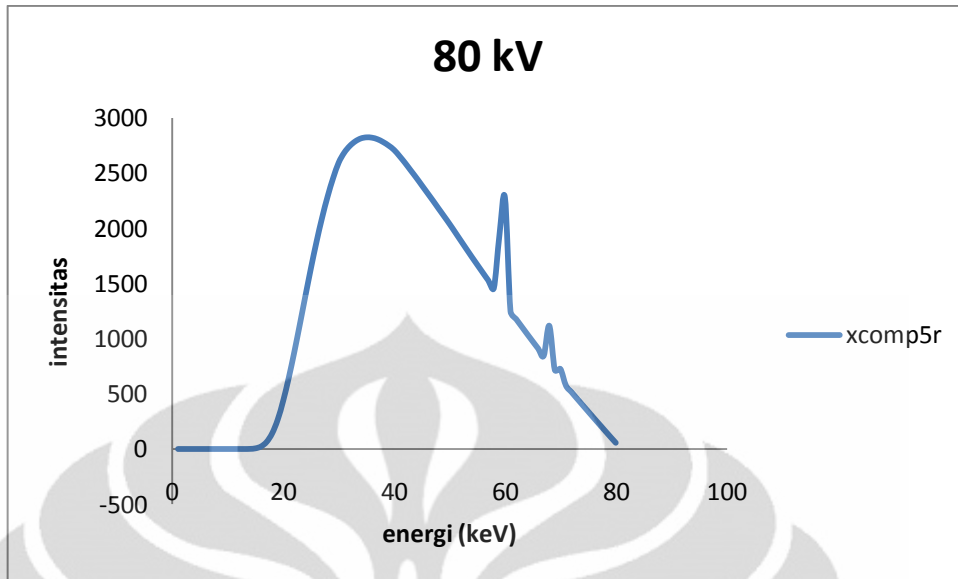


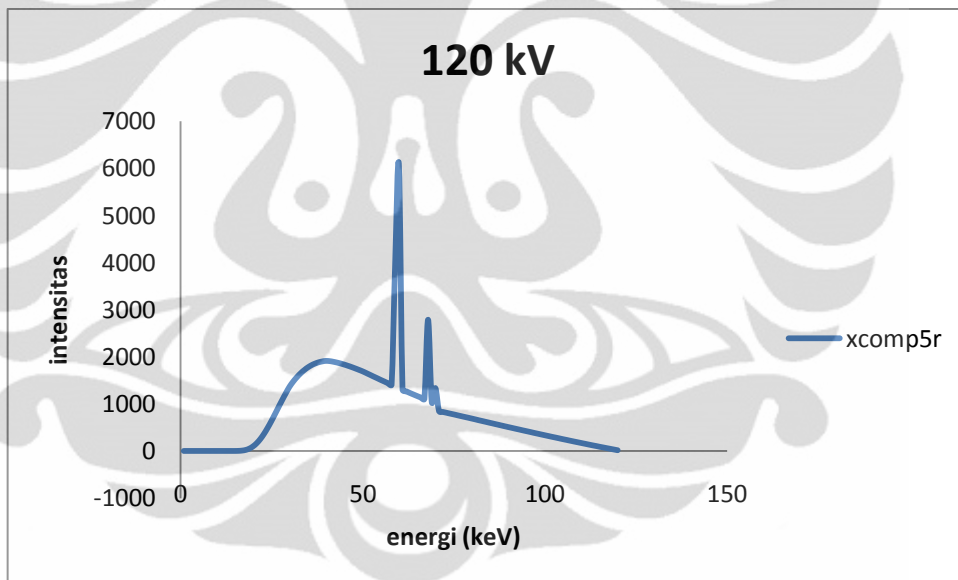
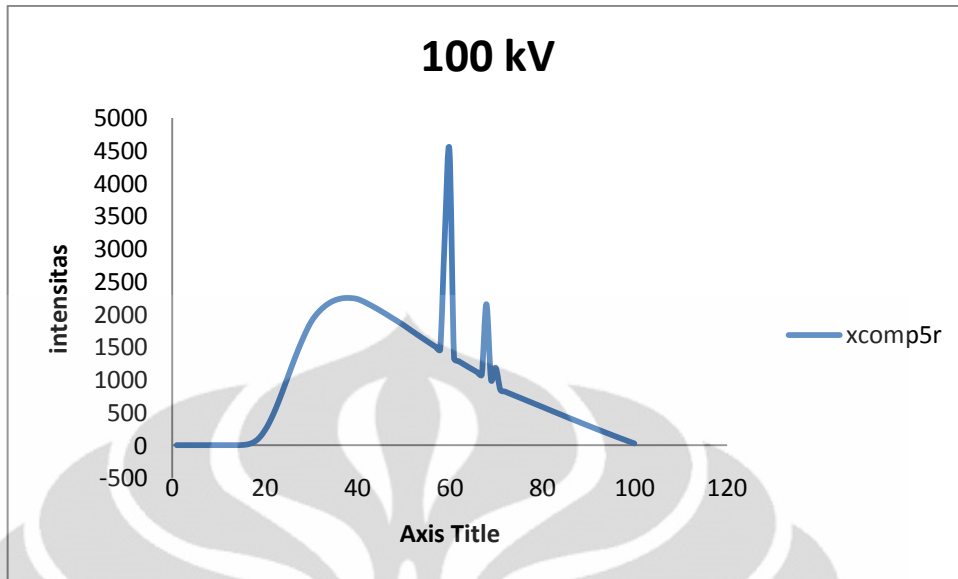
Lampiran 3 : Kurva Spektrum Sinar-X menggunakan program xcomp5r dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR

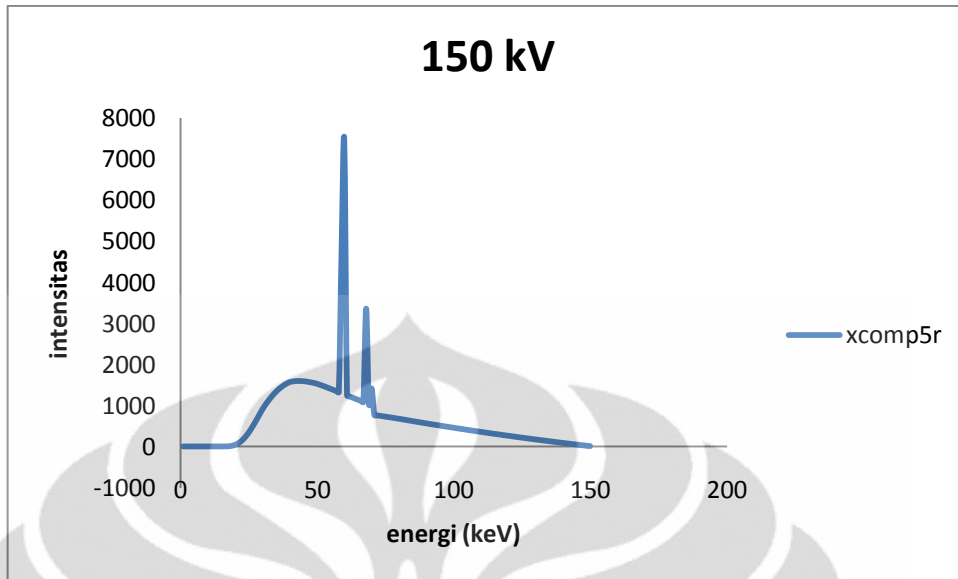












**Lampiran 4 :** Gabungan Kurva Spektrum Sinar-X dan detektor CdTe dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR

