



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KORELASI KOEFISIEN HOMOGENITAS
TERHADAP BESAR FWHM SPEKTRUM SINAR-X
PADA KUALITAS RADIASI RQR**

SKRIPSI

**RACHMAT ANDIKA
0606068594**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KORELASI KOEFISIEN HOMOGENITAS
TERHADAP BESAR FWHM SPEKTRUM SINAR-X
PADA KUALITAS RADIASI RQR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

**RACHMAT ANDIKA
0606068594**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rachmat Andika

NPM : 0606068594

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rachmat Andika
NPM : 0606068594
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas
Terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X Pada
Kualitas Radiasi RQR

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 : Prof. Dr. Djarwani S Soejoko (.....)
Penguji : Kristina Tri Wigati, M.Si (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi yang berjudul “Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas Terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X Pada Kualitas Radiasi RQR” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Departemen Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Pada proses penyusunan skripsi ini penulis banyak mendapatkan bantuan baik moral maupun material dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan kepada Bapak Dwi Seno K, M.Si selaku Pembimbing I dan Bapak Heru Prasetyo, M.Si selaku Pembimbing II yang dengan sabar mau meluangkan waktunya untuk membimbing, memberi masukan, pendapat maupun saran kepada penulis.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Isom Mudzakir S.Si, M.Si selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan dukungan serta bimbingan selama ini. Tak lupa juga penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Muhammad Hikam serta seluruh dosen pengajar Departemen Fisika.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu memberi semangat dan masukan, dukungan, dan mendoakan agar tugas akhir ini selesai tepat waktu. Kakakku Anita dan Adikku Agung yang dengan tulus membantu semua kesulitan yang sering saya hadapi.
2. Tim RQR-RQA dan Tim Brakhiterapi dibawah bimbingan Bapak Heru Prasetyo, M.Si. Koko, Fadli, Rifki, Ira, dan teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan. Terima kasih karena selalu mau saling membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini, khususnya diskusi mengenai penelitian ini. *One of the best team in my life.*
3. Anastra Celecia Deyan dan keluarga yang telah mendukung serta mendoakan selama penelitian dan penyusunan skripsi ini. Terima kasih untuk Celecia karena dengan sabar dan tulus mendengarkan keluh kesahku dan menemani

suka duka selama penelitian berlangsung. *Thank you, for your generous and loving heart and for the joy you bring into my life.*

4. Teman-teman Fisika, Fauzi, Richard, Icha, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuan dan dukungan yang diberikan selama perkuliahan berlangsung hingga penyusunan skripsi ini.
5. Peneliti BATAN Pasar Jumat dan BATAN Mampang atas bantuannya dalam menyelesaikan penelitian ini.
6. Sahabat-sahabatku, Pandu, Aldi, Aji yang telah memberi ketenangan dan kesenangan di masa kesulitan dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Ucapan terima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan karena keterbatasan penulis.

Dengan segala kekurangan dan ketidaksempurnaan skripsi ini, penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi pembaca.

Penulis

2010

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

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

Nama : Rachmat Andika
NPM : 0606068594
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 :

Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas Terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X Pada Kualitas Radiasi RQR

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 : Rachmat Andika

Program Studi : Fisika

Judul : Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas Terhadap Besar
FWHM Spektrum Sinar-X Pada Kualitas Radiasi RQR

Telah dilakukan simulasi monte carlo untuk pesawat sinar-X dan komponen dengan spesifikasi tabung sinar-X YXLON YTU-320 D03. EGS/BEAMnrc digunakan sebagai program yang sesuai untuk simulasi monte carlo dalam penelitian ini. Proses simulasi monte carlo dibagi menjadi dua modul, modul pertama terdiri dari tabung sinar-X hingga shielding sinar-X dan modul kedua terdiri dari komponen additional filter hingga sistem filter HVL. BEAMDP digunakan untuk mendapatkan distribusi foton sehingga dapat ditentukan FWHM serta homogenitas spektrum. Besar FWHM hasil simulasi monte carlo menunjukkan kesesuaian dengan perhitungan xcomp5r, khususnya pada tegangan tabung 150 kV. Metode pendekatan grafik digunakan untuk mencari hubungan antara FWHM terhadap koefisien homogenitas spektrum berdasarkan data xcomp5r. Persamaan kurva digunakan untuk perhitungan koefisien homogenitas spektrum monte carlo. Dengan menggunakan FWHM, didapatkan koefisien homogenitas spektrum monte carlo. Koefisien homogenitas monte carlo yang didapat memiliki ketidakpastian kurang dari 2% terhadap koefisien homogenitas berdasarkan IAEA TRS No. 457 maupun xcomp5r. Hubungan antara FWHM terhadap koefisien homogenitas yang didapat menunjukkan fungsi polinomial.

Kata Kunci : Simulasi monte carlo, spektrum sinar-X, mean energy,
FWHM, koefisien homogenitas

xv+64 halaman ; 18 gambar; 9 tabel

Daftar Acuan : 14 (1978-2010)

ABSTRACT

Name : Rachmat Andika

Study Program: Physics

Title : Analysis of Correlation Homogeneity Coefficient with FWHM of
X-ray Spectra at Radiation Quality RQR

Have been studied Monte Carlo simulation of x-ray machine with its components based on specification of YXLON YTU – 320 D03 x-ray tube. EGS/BEAMnrc has used as an appropriate program for Monte Carlo simulation. In this study, Monte Carlo simulation divided into two modules: the first module consists of x-ray tube up to x-ray shielding and the second module consists of additional filter up to HVL filtration system. BEAMDP is used to find photon distribution for calculation of FWHM spectra and homogeneity coefficient. FWHM of Monte Carlo simulation has showed consistency with xcomp5r calculation, especially when tube potential 150 kV is applied. The method of graph approximation is used to find relation between FWHM and coefficient of homogeneity based on xcomp5r data. The coefficient of homogeneity of Monte Carlo simulation has been found by its relation. The difference of homogeneity coefficient between Monte Carlo simulation and xcomp5r or TRS No. 457 is less than 2%. The correlation between FWHM and homogeneity coefficient of x-ray spectra is polynomial function.

Keyword : Monte Carlo simulation, x-ray spectra, mean energy, FWHM,
coefficient of homogeneity

xv+64 pages ; 18 pictures; 9 tables

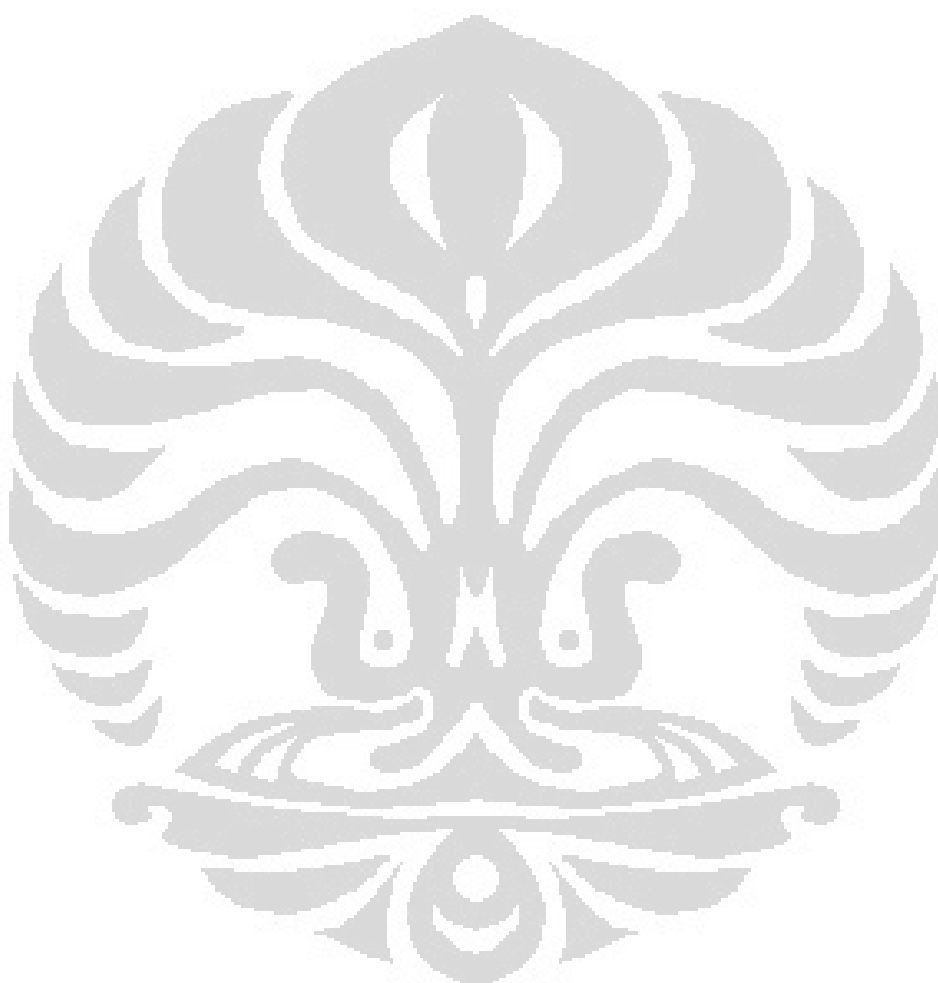
Bibliography : 14 (1978-2010)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Pembatasan Penelitian.....	2
1.4 Metode Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Produksi Sinar-X.....	6
2.1.1 Sinar-X Karakteristik.....	8
2.1.2 Sinar-X Bremstrahlung.....	9
2.2 Interaksi Radiasi terhadap Medium.....	10
2.3 FWHM – <i>Full Width at Half Maximum</i>	13

2.4 Koefisien Homogenitas pada Kualitas Radiasi RQR.....	14
2.5 Metode Monte Carlo dengan BEAMnrc.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Pemodelan Tabung Sinar-X.....	19
3.2 Pengambilan Data Spektrum menggunakan xcomp5r.....	24
3.3 Pengolahan Data Simulasi BEAMnrc.....	24
3.3.1 Perhitungan Energi Efektif.....	24
3.3.2 Perhitungan Besar FWHM Spektrum Sinar-X.....	25
3.3.3 Proses <i>Smoothing</i> terhadap Spektrum Sinar-X.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Penentuan <i>Mean Energy</i> pada Spektrum Sinar-X.....	27
4.2 Pemodelan Pesawat Sinar-X beserta Komponen.....	29
4.2.1 Pembentukan Spektrum hasil pemodelan sebagai output atau keluaran tabung sinar-X.....	29
4.2.2 Pengaruh Pemasangan Filter Tambahan pada Spektrum Sinar-X...33	
4.3 Perbandingan Spektrum Sinar-X BEAMnrc dan xcomp5r dengan Pemasangan Filter Aluminium.....	35
4.4 Penentuan FWHM pada Spektrum Sinar-X.....	38
4.4.1 Penentuan Hubungan Mean Energy terhadap Besar FWHM Gaussian Spektrum Sinar-X.....	39
4.5 Penentuan Korelasi Koefisien Homogenitas terhadap besar FWHM Spektrum Sinar-X.....	40
4.5.1 Penentuan Hubungan Homogenitas dan FWHM Gaussian berdasarkan data xcomp5r.....	41
4.5.2 Korelasi Homogenitas monte carlo terhadap besar FWHM Spektrum Sinar-X.....	42

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran.....	47
DAFTAR REFERENSI	48
LAMPIRAN	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema tabung sinar-X beserta komponen penyusunnya.....	7
Gambar 2.2 Spektrum Sinar-X Keluaran tabung sinar-X dengan energi Maksimum 150 keV.....	8
Gambar 2.3 Transisi elektron pada tiap kulit yang berbeda disertai emisi foton Karakteristik.....	9
Gambar 2.4 Terjadinya sinar-X Bremstrahlung dalam medium penyerap.....	10
Gambar 2.5 Proses terjadinya efek fotolistrik pada atom dalam medium.....	11
Gambar 2.6 Proses terjadinya hamburan Compton pada atom dalam medium....	13
Gambar 3.1 (a) Tabung sinar-X dan sistem shutter serta <i>shielding</i> sinar-X.....	18
(b) Komponen pendukung pengukuran sinar-X terdiri dari <i>additional</i> filter, kolimator, <i>monitoring chamber</i> dan sistem HVL.....	18
Gambar 3.2 (a) Hasil pemodelan komponen modul dengan simulasi monte carlo BEAMnrc modul pertama.....	21
(b) Hasil pemodelan komponen modul dengan simulasi monte carlo BEAMnrc modul kedua.....	22
Gambar 3.3 Pemodelan 3-D BEAMnrc menggunakan EGS_Windows_4 untuk Pesawat sinar-X secara keseluruhan.....	23
(a) Tampak samping: elektron datang dari kanan menuju anoda yang yang terletak di bagian kiri dan terjadi penumbukan.....	23
(b) Tampak Depan: elektron dan foton terhambur ke berbagai arah yang mensimulasikan pergerakan elektron dan foton selama simulasi pengukuran pada pesawat sinar-X.....	23
Gambar 4.1 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 40 kV.....	29

Gambar 4.2 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 70 kV.....	31
Gambar 4.3 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 150 kV.....	32
Gambar 4.4 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo untuk modul Kedua dengan tegangan tabung sinar-X.....	34
(A) 40 kV dengan ketebalan 2.70 mm Al.....	34
(B) 70 kV dengan ketebalan 2.93 mm Al.....	34
(C) 150 kV dengan ketebalan 4.26 mm Al.....	34
Gambar 4.5 Kurva Spektrum sinar-X simulasi monte carlo dan xcomp5r.....	37
(a) Tegangan tabung 40 kV setelah dilakukan proses <i>smoothing</i> untuk monte carlo menggunakan Gnumeric.....	37
(b) Tegangan tabung 70 kV setelah dilakukan proses <i>smoothing</i> untuk monte carlo menggunakan Gnumeric.....	37
(c) Tegangan tabung 150 kV tanpa <i>smoothing</i>	37
Gambar 4.6 Hubungan <i>Mean energy</i> terhadap FWHM spektrum sinar-X.....	40
Gambar 4.7 Kurva Hubungan FWHM spektrum Homogenitas xcomp5r.....	42
Gambar 4.8 Kurva Hubungan FWHM terhadap Koefisien Homogenitas berdasarkan simulasi monte carlo dan xcomp5r.....	43
Gambar 4.9 Perbandingan Homogenitas dari beberapa referensi terhadap tegangan tabung sinar-X.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sinar-X Karakteristik Kulit K dengan target Tungsten.....	9
Tabel 2.2	Karakterisasi Kualitas Berkas Radiasi RQR TRS No. 457.....	15
Tabel 3.1	Komponen Modul Simulasi BEAMnrc beserta Pendefinisian.....	20
Tabel 4.1	<i>Mean Energy</i> Simulasi Monte Carlo dan xcomp5r untuk modul pertama.....	27
Tabel 4.2	<i>Mean Energy</i> Simulasi Monte Carlo dan xcomp5r untuk modul kedua.....	28
Tabel 4.3	Sinar-X karakteristik Kulit L beserta Energi.....	30
Tabel 4.4	Sinar-X karakteristik Kulit K beserta Energi.....	36
Tabel 4.5	FWHM Gaussian berdasarkan Spektrum Sinar-X simulasi Monte Carlo dan xcomp5r.....	38
Tabel 4.6	<i>Mean Energy</i> distribusi fluks foton dan FWHM Gaussian spektrum sinar-X.....	39

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I	Bagan Kerja.....	50
LAMPIRAN II	Perhitungan Densitas untuk Data Material PEGS4 dalam simulasi monte carlo.....	51
LAMPIRAN III	Data Pengolahan <i>Mean Energy</i> simulasi monte carlo modul kedua.....	55
LAMPIRAN IV	Kurva Distribusi Spektrum sinar-X dalam melakukan perhitungan FWHM beserta tabel FWHM dalam satuan energi untuk monte carlo dan xcomp5r.....	57
LAMPIRAN V	Kurva Distribusi Spektrum Sinar-X menggunakan program xcomp5r dengan tegangan tabung disesuaikan dengan Kualitas Radiasi RQR.....	59
LAMPIRAN VI	Tabel Perbandingan Homogenitas xcomp5r terhadap Homogenitas berdasarkan IAEA TRS No. 457.....	63
LAMPIRAN VII	Tabel Koefisien Homogenitas Spektrum simulasi monte carlo dan perbandingan terhadap data xcomp5r maupun data IAEA TRS No.457.....	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada bidang radiodiagnostik maupun radioterapi, sinar-X memberikan peranan yang sangat penting. Hasil pencitraan yang didasarkan pada radiasi sinar-X menuntut kualitas sinar-X yang digunakan harus sesuai. Hal tersebut dikarenakan hasil pencitraan akan mengarahkan pada kesimpulan akan diagnosa terhadap adanya suatu kelainan dalam tubuh seorang pasien. Keakuratan dan ketelitian sangat dibutuhkan untuk mendapatkan tingkat resolusi yang baik.

Pengukuran dengan detektor diperlukan untuk mengetahui besar dosis yang digunakan dalam radiodiagnostik dan radioterapi. Detektor yang digunakan untuk pengukuran diharapkan memberikan hasil pengukuran yang tepat, oleh karena itu perlu dilakukan kalibrasi terhadap detektor. Proses kalibrasi detektor mengharuskan energi yang digunakan terstandarisasi dengan baik, agar diketahui respon detektor terhadap energi yang digunakan serta diperoleh juga faktor kalibrasi yang sesuai. Hal ini penting dilakukan karena standarisasi dapat memastikan detektor yang dikalibrasi memberikan hasil pengukuran yang sama walaupun detektor tersebut dikalibrasi pada laboratorium yang berbeda. Dengan demikian kualitas dari berkas radiasi harus distandarisasi pula setepat mungkin, agar diperoleh faktor kalibrasi yang tepat. Kualitas radiasi sinar-X menunjukkan kemampuan penetrasi berkas radiasi sinar-X, maka nilai HVL digunakan untuk menentukan kualitas radiasi sinar-X. Penggunaan parameter HVL sangat penting karena kemampuan penetrasi radiasi sinar-X akan berbeda tergantung spektrum dan energi efektif radiasi sinar-X. Selain itu, kualitas radiasi akan sangat ditentukan oleh filter yang dilalui oleh radiasi sinar-X. Hal ini disebabkan penggunaan filter yang semakin tebal akan menyebabkan kualitas radiasi semakin tinggi. Meskipun energi

maksimum sinar-x sama, nilai HVL akan berbeda jika jumlah filter yang dilalui lebih banyak.

Dalam penelitian ini akan dicari spektrum berkas radiasi sinar-X pada beberapa energi dengan menggunakan metode simulasi Monte Carlo dan program xcomp5r. Spektrum sinar-X dapat menunjukkan besar FWHM (*Full Width at Half Maximum*) yang menunjukkan kecenderungan bentuk kurva dan dapat digunakan untuk menentukan koefisien homogenitasnya. FWHM dan koefisien homogenitas menunjukkan karakteristik suatu berkas radiasi sinar-X. FWHM dan koefisien homogenitas yang didapatkan berdasarkan metode Monte Carlo akan dibandingkan dengan koefisien homogenitas yang didefinisikan oleh *Technical Report Series No. 457* yang merupakan perbandingan antara HVL pertama dan HVL kedua.¹⁴

Metode Monte Carlo pada penelitian ini 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. Dalam penelitian ini simulasi Monte Carlo yang dipergunakan adalah BEAMnrc.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mencari koefisien homogenitas spektrum sinar-X dengan menggunakan metode Monte Carlo dan xcomp5r. Selain itu penelitian ini bertujuan juga untuk mencari hubungan antara koefisien homogenitas spektrum berdasarkan TRS 457 dengan nilai FWHM spektrum sinar-X.

1.3 Pembatasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode Monte Carlo BEAMnrc dengan maksud mendapatkan spektrum sinar-X yang tidak

memerlukan koreksi medium detektor. Oleh karena itu, simulasi spektrum sinar-X akan langsung dilakukan pada medium udara. Besar FWHM yang didapat dari spektrum sinar-X tersebut akan digunakan untuk penentuan koefisien homogenitas spektrum tersebut. Penelitian ini akan membatasi masalah pada penggunaan tegangan tabung 40 kV untuk RQR 2, 70 kV untuk RQR 5 dan 150 kV untuk RQR 10.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan terdiri dari beberapa tahap antara lain:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan maksud mempelajari teori dasar sebagai landasan dilakukannya penelitian ini dan penulisan skripsi ini. Tinjauan pustaka dan informasi yang berkaitan dengan penelitian ini didapat dari literatur, penjelasan dosen pembimbing, rekan mahasiswa, jurnal dan buku-buku yang berkaitan dengan penyelesaian tugas akhir ini.

2. Simulasi Komputer

Simulasi komputer dilakukan dengan maksud mendapatkan data-data penelitian yang dibutuhkan. Simulasi komputer ini dilakukan dalam dua bagian, yaitu simulasi sinar-X dan simulasi komponen. Simulasi pada komponen terpasang dilakukan dengan menggunakan *output* dari simulasi pertama, yaitu simulasi sinar-X. Hasil simulasi bagian kedua digunakan sebagai data yang diolah untuk mendapatkan spektrum sinar-X tiap energi dan mendapatkan FWHM spektrum sinar-X.

3. Metode Analisis Data

Metode ini merupakan pengamatan terhadap data yang diperoleh sehingga memudahkan untuk mengambil kesimpulan akhir penelitian ini dan saran-saran yang bermanfaat.

1.5 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian ini dalam penulisan skripsi terdiri dari V bab, dimana masing-masing bab tersebut terdiri dari beberapa subbab yang memudahkan alur pemaparan penelitian ini :

BAB I PENDAHULUAN

Pada Bab Pendahuluan ini akan dijelaskan dalam dua subbab penting yang dapat menjelaskan penelitian ini secara garis besar. Adapun subbab yang pertama adalah mengenai Latar Belakang yang menjelaskan alasan dilakukannya penelitian ini. Dalam subbab ini dijelaskan pula perumusan masalah yang akan memberikan penekanan pada pokok bahasan. Subbab berikutnya adalah subbab Tujuan Penelitian. Subbab ini merupakan tujuan akhir yang ingin dicapai dari penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab Tinjauan Pustaka ini akan berisi tentang teori atau prinsip dasar yang melandasi dilakukannya penelitian ini. Subbab pada Bab Tinjauan Pustaka ini akan membahas secara terperinci mengenai definisi dari materi-materi yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB III PENELITIAN

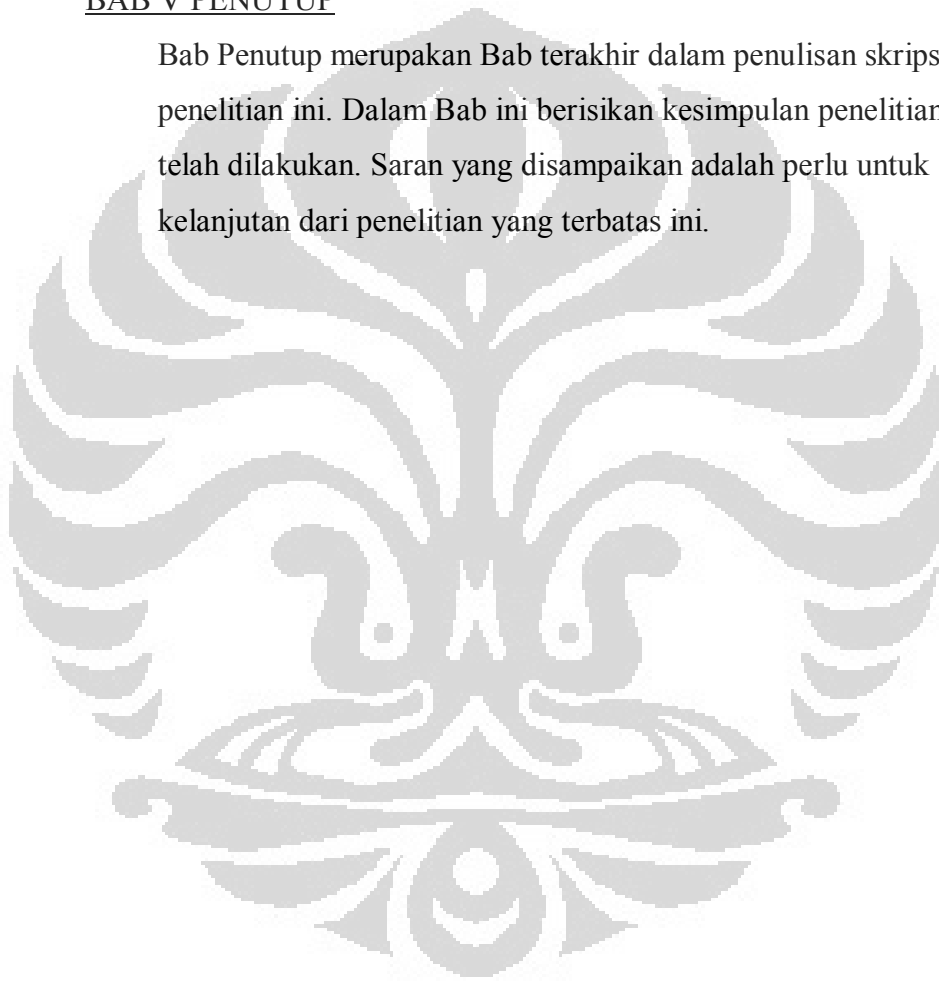
Pada Bab Penelitian ini akan diberikan proses penelitian secara terperinci yang berisikan keseluruhan kegiatan penelitian dalam mencapai tujuan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab Hasil dan Pembahasan berisikan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Bersamaan dengan hasil yang disampaikan, dilakukan pula pembahasan terhadap hasil yang didapat.

BAB V PENUTUP

Bab Penutup merupakan Bab terakhir dalam penulisan skripsi penelitian ini. Dalam Bab ini berisikan kesimpulan penelitian yang telah dilakukan. Saran yang disampaikan adalah perlu untuk kelanjutan dari penelitian yang terbatas ini.



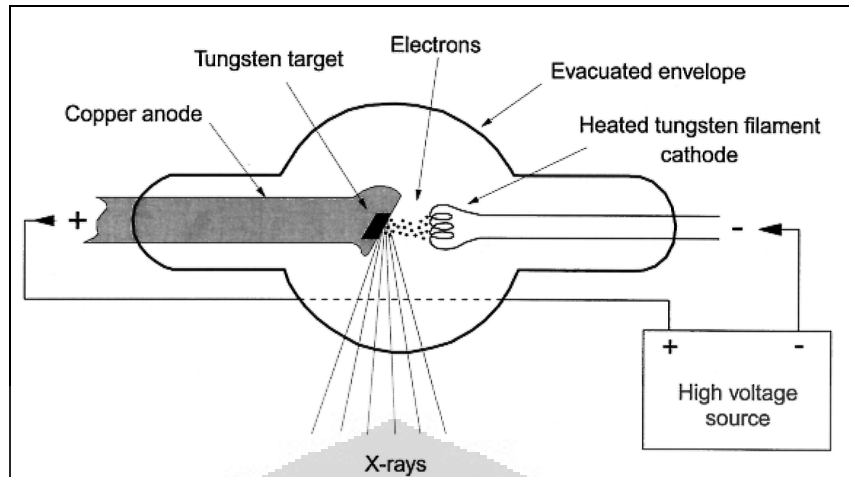
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Interaksi radiasi sinar-X yang terjadi dalam medium merupakan hasil transport foton dan elektron dalam medium. Simulasi dengan teknik monte carlo dapat digunakan karena monte carlo melibatkan seluruh distribusi probabilitas yang meliputi interaksi fisis foton dan elektron dalam berbagai medium. Untuk mendapatkan simulasi transport elektron dan foton secara akurat, maka perlu melakukan perhitungan terhadap proses interaksi yang terjadi dalam medium secara keseluruhan.

2.1 Produksi Sinar-X

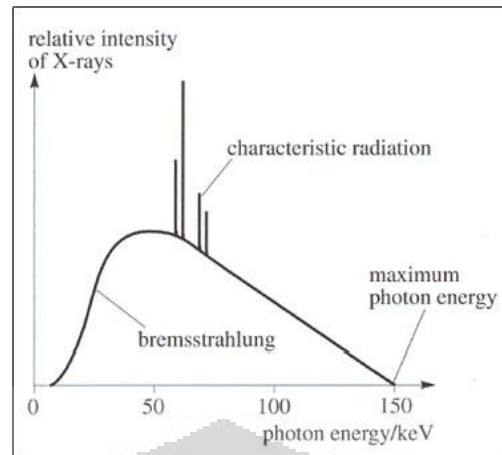
Radiasi sinar-X merupakan salah satu jenis gelombang elektromagnetik yang mempunyai berbagai manfaat dalam bidang medis. Sinar-X diproduksi dengan datangnya elektron berkecepatan tinggi yang berinteraksi dengan atom dalam medium. Produksi sinar-X tersebut terjadi dalam tabung sinar-X dengan kondisi dalam tabung adalah hampa udara, diperlihatkan pada Gambar 2.1. Tabung sinar-X memiliki katoda dan anoda terdapat dalam tabung kaca dengan tekanan yang sangat rendah. Katoda yang berfungsi sebagai sumber elektron terdiri dari tungsten dalam bentuk kumparan. Elektron yang berada dalam atom katoda mengalami ionisasi ketika beda tegangan diaplikasikan pada tabung. Sejumlah elektron dengan kecepatan tinggi akan menumbuk anoda pada daerah target. Target yang digunakan merupakan medium dengan nomor atom Z yang tinggi dan konduktivitas termal yang baik. Tumbukan elektron pada anoda akan menghasilkan foton sinar-X yang akan difokuskan pada jendela tipis dan keluar dari tabung sinar-X.



Gambar 2.1 Skema tabung Sinar-X beserta komponen penyusunnya⁶

Sistem sirkulasi pendingin anoda dapat terdiri dari minyak transformer maupun air. Medium pendingin yang digunakan menjadi penting dalam produksi sinar-X karena sinar-X yang dihasilkan hanya sebagian kecil dari tumbukan elektron, sebagian besar akibat tumbukan elektron akan diubah menjadi panas. Dalam radiodiagnostik, sinar-X yang dihasilkan hanya sekitar 1% dan sisanya 99% diubah menjadi panas.

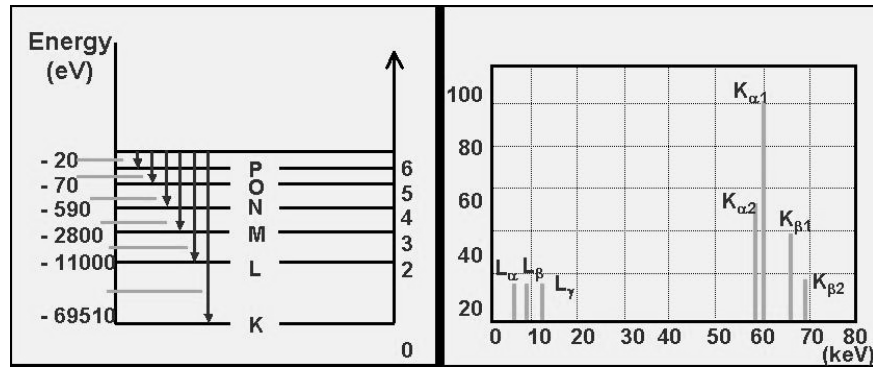
Sinar-X yang dihasilkan terdiri dari sinar-X karakteristik dan bremstrahlung. Perbedaan antara kedua sinar-X tersebut adalah pada proses interaksi dan bentuk spektrum. Sinar-X karakteristik merupakan spektrum diskrit sedangkan sinar-X bremstrahlung merupakan spektrum kontinu, diperlihatkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Spektrum Sinar-X Keluaran tabung sinar-X dengan energi maksimum 150 keV

2.1.1 Sinar-X Karakteristik

Sinar-X Karakteristik dihasilkan ketika elektron datang berinteraksi dengan elektron pada atom target. Elektron pada atom target akan terionisasi. Kekosongan pada kulit elektron tersebut akan diisi oleh elektron pada kulit luar. Transisi elektron dari kulit terluar menuju kekosongan pada kulit lebih dalam akan mengemisikan foton yang disebut sinar-X karakteristik. Sinar-X karakteristik tersebut berbeda-beda bergantung pada transisi elektron pada kulit diperlihatkan pada gambar 2.3. Transisi elektron dari kulit yang berbeda akan menghasilkan jenis foton karakteristik yang berbeda pula dengan energi berbeda tergantung pada energi ikatan elektron dalam kulit atom, misal sinar-X karakteristik kulit K pada tabel 2.1.



Gambar 2.3 Transisi elektron pada tiap kulit yang berbeda disertai emisi foton karakteristik.

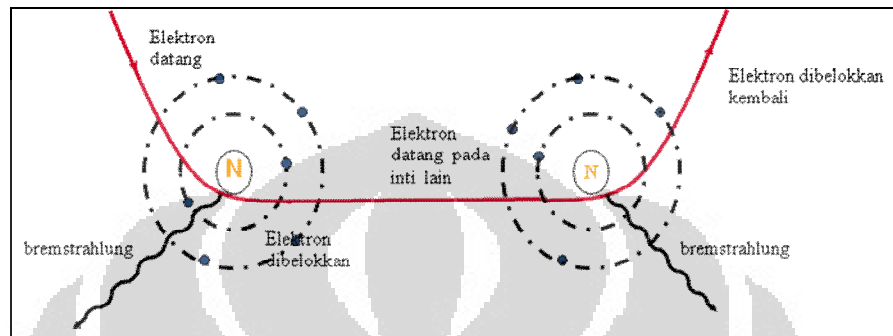
Tabel 2.1 Sinar-X Karakteristik Kulit-K dengan target Tungsten²

Transition	Designation	Energy (keV)
K-L _{III}	α_1	59.321
K-L _{II}	α_2	57.984
K-M _{II}	β_3	66.950
K-M _{III}	β_1	67.244
K-M _{IV}	$\beta_{5/1}$	67.654
K-M _V	$\beta_{5/2}$	67.716
K-N _{II}	$\beta_{2/1}$	69.033
K-N _{III}	$\beta_{2/2}$	69.101
K-N _{IV}	$\beta_{4/1}$	69.269
K-N _V	$\beta_{4/2}$	69.283
K-O _{II}	$\beta_{2/3}$	69.478
K-O _{III}	$\beta_{2/4}$	69.489

2.1.2 Sinar-X Bremstrahlung

Terjadinya sinar-X bremstrahlung berbeda dengan sinar-X karakteristik, bremstrahlung terbentuk karena adanya pengereman elektron yang datang mendekati inti atom. Pengereman elektron tersebut dikarenakan muatan dan massa inti atom yang relatif lebih besar dibandingkan dengan elektron. Sesuai dengan hukum kekekalan energi, sebagian energi kinetik elektron digunakan

untuk membelokkan jalur pergerakan elektron melewati inti atom tanpa menumbuknya, sebagian energi kinetik elektron tersebut dilepas menjadi energi foton, dengan foton yang lebih dikenal dengan bremsstrahlung diperlihatkan dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Terjadinya sinar-X Bremsstrahlung dalam medium penyerap

2.2 Interaksi Radiasi terhadap Medium

Radiasi merupakan jenis perpindahan energi tanpa memerlukan adanya medium perambatan. Untuk perpindahan energi, diperlukan suatu interaksi terhadap medium. Ketika berkas radiasi tepat menembus suatu medium, berkas radiasi ini akan menimbulkan terjadinya berbagai jenis interaksi. Munculnya jenis interaksi ini tidak selalu sama dikarenakan interaksi ini bergantung pada beberapa parameter antara lain energi kuantum dan nomor atom Z dari medium penyerapan radiasi.

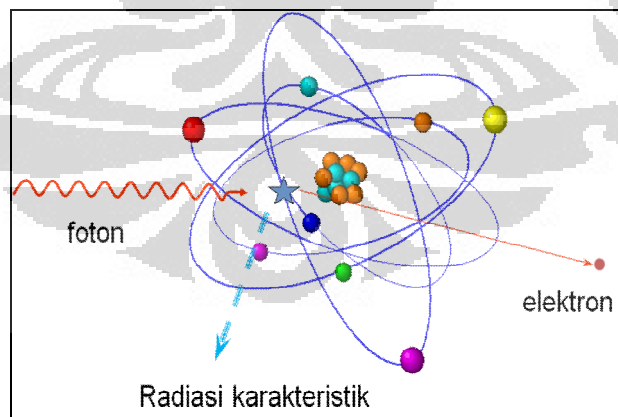
Berbeda halnya dengan elektron, radiasi foton merupakan jenis radiasi pengion sekunder karena interaksi antara foton terhadap atom, nukleus maupun elektron dalam medium terjadi tidak secara langsung menimbulkan proses ionisasi. Interaksi yang dihasilkan merupakan hasil dari eksitasi elektron orbital atau pembentukan pasangan elektron positif-negatif. Elektron – elektron tersebut dapat menyebabkan terjadinya efek ionisasi dan sekaligus merupakan dasar pembelajaran dalam efek radiasi dan deteksi foton.⁸ Interaksi foton yang memiliki

peranan penting antara lain efek fotolistrik, hamburan Compton dan hamburan Rayleigh.

Efek fotolistrik merupakan efek yang didominasi oleh foton berenergi rendah. Efek fotolistrik terjadi ketika foton berenergi rendah datang menembus pada medium. Energi foton tersebut diserap secara keseluruhan oleh atom seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Energi yang terserap tersebut digunakan oleh atom untuk memutuskan energi ikatan elektron dalam atom, dimana juga merupakan fungsi kerja W , dan sesuai dengan hukum kekekalan energi maka sisa energi tersebut digunakan oleh fotoelektron sebagai energi kinetik E_k untuk bergerak bebas, sesuai dengan persamaan

$$h\nu = E_k + W \quad (1.1)$$

Dimana $h\nu$ merupakan energi foton datang pada medium, E_k adalah energi kinetik dari fotoelektron serta W merupakan fungsi kerja atom dalam medium penyerapan. Kekosongan pada kulit elektron akan ditempati oleh elektron lain sehingga memungkinkan terjadinya pemancaran sinar-X karakteristik atau elektron Auger yang selanjutnya mengalami tumbukan elektronik yang melibatkan proses eksitasi maupun ionisasi.⁸



Gambar 2.5 Proses terjadinya efek fotolistrik pada atom dalam medium

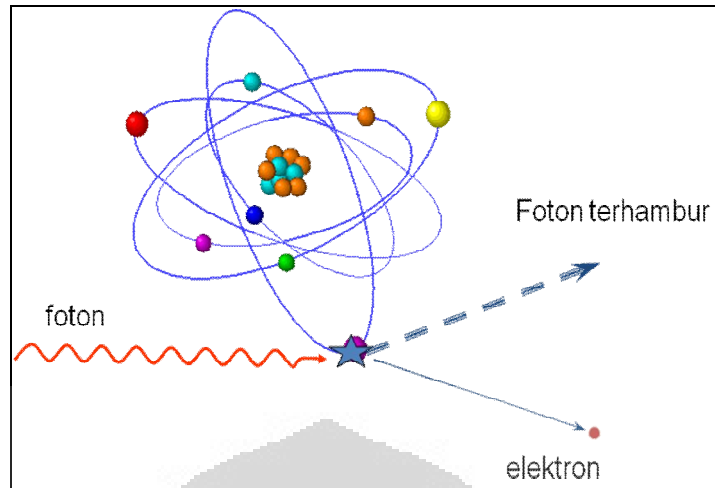
Hamburan Compton, juga dikenal sebagai hamburan inkoheren, merupakan interaksi yang terjadi karena adanya foton berenergi medium pada orde 1 MeV datang pada suatu medium. Diasumsikan secara umum bahwa elektron dalam atom yang ditumbuk oleh foton datang merupakan elektron bebas dan stasioner.¹ Pada hamburan Compton foton dengan energi terkuanitisasi datang dan menumbuk dengan elektron stasioner bebas pada medium, energi yang dimiliki foton datang hanya sebagian yang diserap oleh elektron tersebut. Tumbukan ini mengakibatkan elektron dalam medium terhambur dengan sudut hambur θ relatif terhadap arah foton datang, dengan energi kinetik T . Foton terhambur $h\nu'$ bergerak dengan sudut hambur pada sisi berlawanan pada bidang hambur yang sama, seperti pada Gambar 2.6. Berdasarkan hukum kekekalan energi, keseluruhan hamburan Compton sesuai dengan persamaan

$$h\nu = h\nu' + T \quad (1.2)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (1.3)$$

Dimana $h\nu$ merupakan energi foton dan T merupakan energi kinetik elektron untuk terhambur dengan sudut hambur θ .

Berbeda dengan efek Compton, hamburan Rayleigh merupakan hamburan koheren yang bersifat elastis. Hamburan Rayleigh disebut hamburan koheren karena foton dihamburkan oleh interaksi dari keseluruhan atom. Hamburan Rayleigh merupakan salah satu proses interaksi foton dimana foton dihamburkan oleh elektron yang terikat dalam atom. Atom tersebut tidak mengalami eksitasi maupun ionisasi. Foton secara langsung dihamburkan dengan sudut yang sangat kecil dan mempunyai energi yang sama dengan foton yang datang. Sudut hamburan foton hanya bergantung pada nomor atom Z dan energi foton $h\nu$.



Gambar 2.6 Proses terjadinya hamburan Compton pada atom dalam medium

2.3 FWHM - *Full Width at Half Maximum*^{4,5}

FWHM merupakan lebar atau interval dari dua nilai tertentu dari variabel independen dimana variabel dependen bernilai sama dengan setengah dari nilai maksimum. FWHM yang didapat merupakan hasil perhitungan FWHM pada fungsi Gaussian, dimana persamaan yang sesuai adalah

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1.4)$$

Dimana σ merupakan deviasi standard. Besar FWHM untuk Gaussian dapat ditentukan dengan menetapkan titik setengah maksimum x_0 dan konstanta dapat diabaikan, sehingga

$$\frac{1}{2} f(x_{maks}) = e^{-(x_0-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1.5)$$

Ketika $f(x_{maks})$ terjadi pada $x_{maks} =$, maka

$$\begin{aligned}
e^{-(x_0-\mu)^2/(2\sigma^2)} &= \frac{1}{2} f(\mu) = \frac{1}{2} \\
e^{-(x_0-\mu)^2/(2\sigma^2)} &= 2^{-1} \\
-\frac{(x_0-\mu)^2}{2\sigma^2} &= -\ln 2 \\
(x_0-\mu)^2 &= 2\sigma^2 \ln 2 \\
x_0 &= \pm\sigma\sqrt{2\ln 2} + \mu
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

Maka untuk mencari FWHM Gaussian dapat diketahui dengan

$$FWHM \equiv x_+ - x_- = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.3548\sigma \tag{1.7}$$

2.4 Koefisien Homogenitas pada Kualitas Radiasi RQR^{1,14}

Kualitas radiasi RQR (*radiation qualities in a conventional radiodiagnostic*) dapat diketahui dengan mempelajari koefisien homogenitas dari berkas radiasi. Kualitas Radiasi RQR berdasarkan TRS No. 457 dapat dilihat pada tabel 2.2. Koefisien homogenitas akan berbeda-beda untuk tiap tegangan tabung sinar-X yang digunakan serta besar HVL pertama yang digunakan. Tegangan tabung sinar-X harus dapat dispesifikasikan dalam bentuk tegangan puncak. Ketidakpastian pada pengukuran tegangan tabung sinar-X seharusnya tidak boleh lebih dari 5% atau 2 kV. Oleh karena itu karakterisasi kualitas radiasi dapat diketahui dengan menemukan koefisien homogenitas yang sesuai dengan tegangan tabungnya.

Koefisien homogenitas merupakan perbandingan antara HVL pertama terhadap HVL kedua.¹⁴

$$h = \frac{HVL_1}{HVL_2} \tag{1.8}$$

HVL pertama didefinisikan sebagai ketebalan medium yang dapat mengurangi kerma udara menjadi setengah nilai awal yang terukur tanpa menggunakan medium penyerap. Adapun HVL kedua merupakan sebanding dengan selisih antara ketebalan medium penyerap yang dibutuhkan untuk mengurangi kerma udara menjadi seperempat nilai awal, dan nilai HVL pertama :

$$HVL_2 = d_{\frac{1}{4}} - HVL_1 \quad (1.9)$$

Besar koefisien homogenitas diaplikasikan pada keluaran pesawat sinar-X yaitu untuk mencari lebar spectrum sinar-X. Interval koefisien homogenitas berada pada nilai $0 \leq h \leq 1$. Koefisien homogenitas bernilai 1 menunjukkan bahwa spektrum sinar-X tersebut diskrit. Ketika homogenitas tidak sama dengan 1, berkas foton merupakan distribusi spektrum. Untuk homogenitas kurang dari 1 medium penyerap menguatkan berkas foton, dengan kata lain menghilangkan foton berenergi rendah dari spektrum tersebut (daerah efek fotolistrik). Untuk homogenitas lebih dari 1 medium penyerap melemahkan berkas foton atau menghilangkan foton berenergi tinggi (daerah produksi pasangan).¹ Dalam radiodiagnostik, koefisien homogenitas berada antara 0.7 dan 0.9.

Tabel 2.2 Karakteristik Kualitas Berkas Radiasi RQR TRS No. 457¹⁴

Kualitas Radiasi	Tegangan tabung sinar-X (kV)	HVL pertama (mm Al)	Koefisien homogenitas (h)
RQR 2	40	1.42	0.81
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
RQR 5	70	2.58	0.71
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72

2.5 Metode Monte Carlo dengan BEAMnrc

Metode Monte Carlo merupakan salah satu metode yang mendasarkan pada penggunaan teknik pengambilan data secara acak dari sejumlah distribusi probabilitas. Pada penggunaan metode monte carlo dalam penentuan kualitas radiasi, monte carlo cenderung digunakan untuk mendapatkan besaran deposisi energi (dosis) dan fluks. Monte Carlo dapat mengetahui jalannya partikel-partikel dalam pengukuran hingga partikel-partikel tersebut tidak diinginkan. Jalannya partikel dalam medium terdiri dari beberapa cara, antara lain partikel yang melewati batas geometri, partikel diserap, hingga partikel dihilangkan ketika energi partikel dibawah energi cut-off. Partikel-partikel yang ditranspor dalam metode Monte Carlo adalah hanya partikel-partikel real, dimana partikel real merupakan partikel yang masih dapat diketahui keberadaannya dalam simulasi dan partikel yang memiliki energi di atas energi cut-off.¹³ Meningkatkan jumlah partikel yang ditranspor akan meningkatkan waktu pada simulasi komputer secara linier dan hanya meningkatkan statistik pengukuran yang sebanding dengan akar kuadrat jumlah partikel yang digunakan.

Simulasi BEAMnrc merupakan salah satu aplikasi dari metode monte carlo yang berbasis pada EGS4 yang dapat memodelkan transport elektron dan foton dalam suatu medium. Selama simulasi monte carlo, terjadi berbagai interaksi antara medium dengan elektron maupun foton. Jenis interaksi dan partikel yang berinteraksi mempunyai banyak variasi bergantung pada *cross section* yang ditempuh oleh partikel. *Cross section* untuk tiap medium yang dilalui oleh elektron maupun foton berbeda satu sama lain, sehingga memungkinkan diketahuinya jenis interaksi yang terjadi.

Sebelum simulasi monte carlo dimulai, kumpulan data yang berisikan besaran fisis dari tiap material yang digunakan dalam simulasi dibuat menggunakan PEGS4. Program ini akan menetapkan besaran-besaran fisis seperti *cross section* hamburan, *mean free path* dan *stopping power* elektron pada penggunaan interval energi tertentu.⁷ Besaran-besaran fisis ini akan berbeda-beda bergantung pada unsur, campuran atau senyawa dari material yang digunakan beserta koreksi persen bobot dan densitas material yang ditentukan.

Dalam permodelan BEAMnrc, tiap komponen dalam laboratorium akan direpresentasikan dalam simulasi menggunakan *Component Modules* (CMs) yang merupakan struktur tiga dimensi (3-D). Tiap pengaturan parameter dalam *Component Modules* akan bervariasi bergantung pada komponen yang digunakan. Pada pengaturan parameter terdapat ECUT dan PCUT. Kedua parameter ini mempunyai peranan penting untuk menghentikan partikel yang memiliki energi rendah, karena dapat mengoptimalkan hasil pengukuran baik dari data *phase space* maupun waktu simulasi yang diperlukan. ECUT merupakan batas terendah energi yang akan menghentikan elektron-elektron jika memiliki energi dibawah energi *cut-off* selama proses simulasi transport partikel berlangsung. Sedangkan PCUT merupakan batas terendah energi yang akan menghentikan simulasi foton jika foton – foton tersebut memiliki energi dibawah energi *cut-off*.¹²

Keluaran atau output simulasi BEAMnrc merupakan *data phase space*. Data *phase space* ini dapat digunakan kembali sebagai input untuk simulasi BEAMnrc yang lain ataupun dapat dianalisa menggunakan BEAMDP untuk mendapatkan spektrum, *fluence* dan informasi statistik mengenai keseluruhan partikel hasil simulasi monte carlo.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3. 1 Pemodelan Tabung sinar-X

Tabung sinar-X yang digunakan dalam pemodelan ini merupakan tabung sinar-X YXLON YTU-320 D03 dengan target terbuat dari campuran logam tungsten-rhenium dengan persentase bobot 10% dan dengan ukuran fokus besar 5.5 mm.⁷ Komponen terbagi menjadi enam bagian, keenam bagian tersebut antara lain sistem shutter, *shielding* pesawat sinar-X, *additional filter*, kolimator, *monitor chamber*, dan sistem HVL. Kondisi geometri keenam komponen tersebut ditentukan sesuai dengan kondisi eksperimen. Pengaturan posisi sumber, filter dan lokasi detektor juga disesuaikan dengan kondisi eksperimen yang direkomendasikan oleh TRS 457.



Gambar 3.1 (a) tabung sinar-X dan sistem shutter serta *shielding* sinar-X. (b) komponen pendukung pengukuran sinar-X terdiri dari filter tambahan, kolimator, *monitor chamber* dan sistem HVL.

Dalam pemodelan yang dilakukan, komponen yang digunakan harus menggunakan material yang sesuai. Beberapa data material yang digunakan telah ada dalam data *cross section* PEGS4 beserta koreksi densitas ICRU. Data material yang tidak terdapat dalam data *cross section* PEGS4 dibuat dengan mendefinisikan jenis unsur yang digunakan beserta faktor bobot dan densitasnya, seperti target tungsten-rhenium dan tungsten-molybdenum. Perhitungan densitas dengan faktor bobot yang telah diketahui dalam material dapat dilihat dalam lampiran II. Data PEGS4 merupakan data yang penting untuk mendefinisikan material-material dalam simulasi.

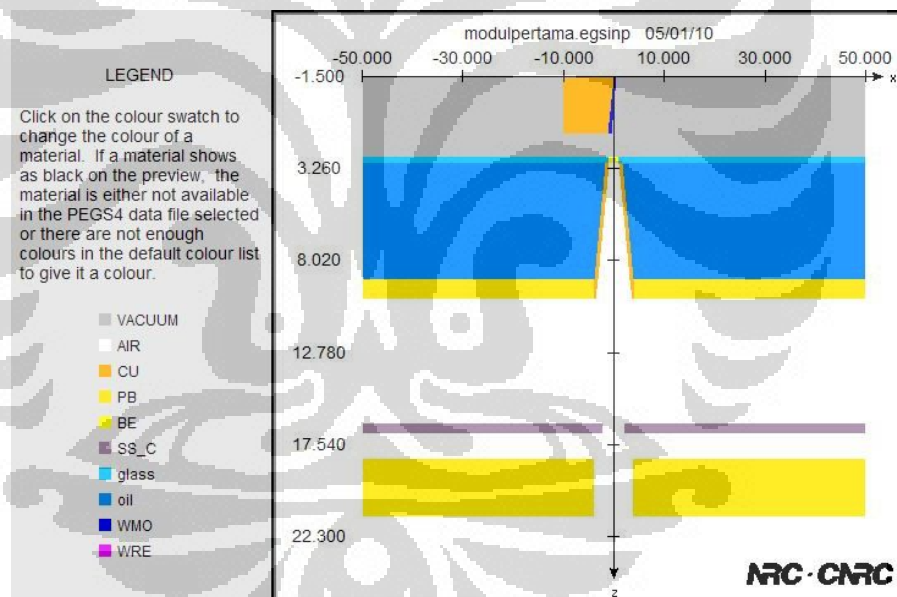
Pemodelan dilakukan dengan mendefinisikan komponen-komponen yang terpasang menjadi komponen modul pada program EGS/BEAMnrc. Komponen modul yang digunakan dapat dilihat dalam tabel 3.1. Pada penelitian ini tidak digunakan phantom atau bilik ionisasi sebagai daerah *sampling*, melainkan hanya menggunakan medium udara yang didefinisikan dengan komponen modul SLABS. Keseluruhan komponen modul akan dikelompokkan menjadi dua bagian modul. Pengelompokkan kedua modul ini dimaksudkan untuk menghemat pemakaian waktu simulasi ketika kemungkinan kesalahan atau ketidaksesuaian hasil terjadi pada tiap bagian modul.

Tabel 3.1 Komponen modul simulasi BEAMnrc beserta pendefinisian

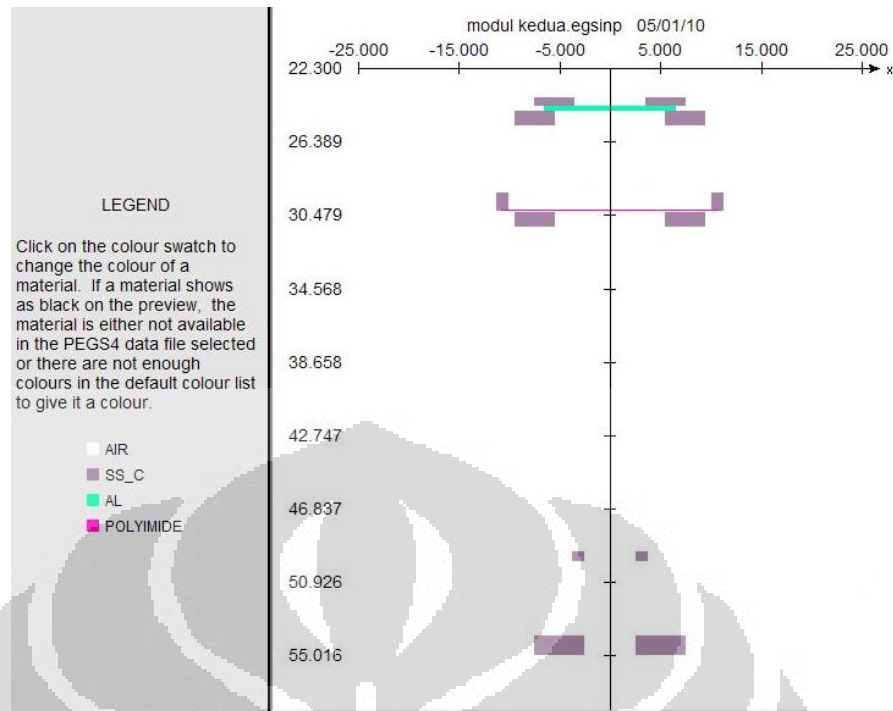
Komponen Modul	Definisi	Material
XTUBE	Target sinar-X	Target Anoda : W-Re Target holder : Cu Daerah sekitar anoda : W-Mo Medium tabung sinar-X : vacuum
SLABS FLATFILT	Jarak target-inherent Sistem 1	Vacuum Inherent : Be Transformer oil : OIL Window tabung : Pb
SLABS FLATFILT	Jarak sistem 1 – sistem 2 Sistem 2	Udara Shutter : Stainless steel Gap : Udara Shielding : Pb
SLABS SLABS CONESTAK	Daerah sampling modul 1 Gap udara <i>Additional filter</i>	Udara Udara Stainless steel
SLABS CONS3R	<i>Additional filter Al</i> Kolimator	Aluminum Stainless steel
SLABS CHAMBER	Gap udara <i>Monitor Chamber</i>	Udara Polymide dan Udara
SLABS CONS3R	Gap udara Kolimator	Udara Stainless steel
SLABS APPLICAT	Gap udara Sistem HVL	Udara Stainless steel
SLABS CONESTAK	Gap udara sistem HVL Sistem HVL	Udara Stainless steel
SLABS	Daerah sampling modul 2	Udara

Pada modul pertama ini terdiri dari komponen modul XTUBE, SLABS, FLATFILT, SLABS, FLATFILT dan SLABS. SLABS terakhir pada modul ini merupakan daerah *sampling* dengan medium udara yang digunakan sebagai data *phase space* untuk sumber foton pada modul selanjutnya. Hasil pemodelan modul pertama dapat dilihat pada Gambar 3.2. Modul kedua menggunakan sumber radiasi yang berasal dari *output* modul pertama dalam bentuk data *phase space*. Data *phase space* ini berisikan parameter keseluruhan hasil simulasi modul pertama, termasuk didalamnya jumlah seluruh partikel seperti foton, elektron bahkan bila dimungkinkan partikel positron. Modul kedua didefinisikan terdiri dari beberapa komponen modul antara lain SLABS, CONESTAK, SLABS,

CONS3R, SLABS, CHAMBER, SLABS, CONS3R, SLABS, APPLICAT, SLABS, CONESTAK, dan SLABS. Komponen yang nilainya berubah sesuai dengan kondisi eksperimen adalah SLABS pada urutan kedua dalam modul ini, yaitu sebagai komponen *additional filter*. Sistem HVL terdiri dari dua komponen modul, dimana komponen tempat radiasi foton masuk adalah APPLICAT yang berbentuk kotak, sedangkan radiasi foton keluar adalah CONESTAK yang berbentuk lingkaran. SLABS terakhir merupakan daerah *sampling* yang diletakkan pada jarak 100 cm, sesuai dengan penempatan detektor pada pengukuran, dari target tabung sinar-X. Hasil pemodelan modul kedua dapat dilihat pada Gambar 3.2. Data yang didapat merupakan data *phase space* yang diolah untuk mendapatkan besar FWHM serta koefisien homogenitas.



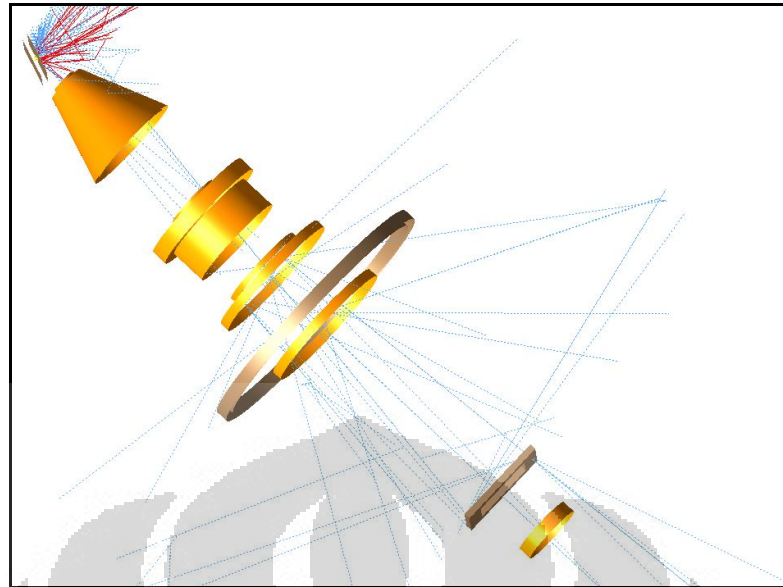
(a)



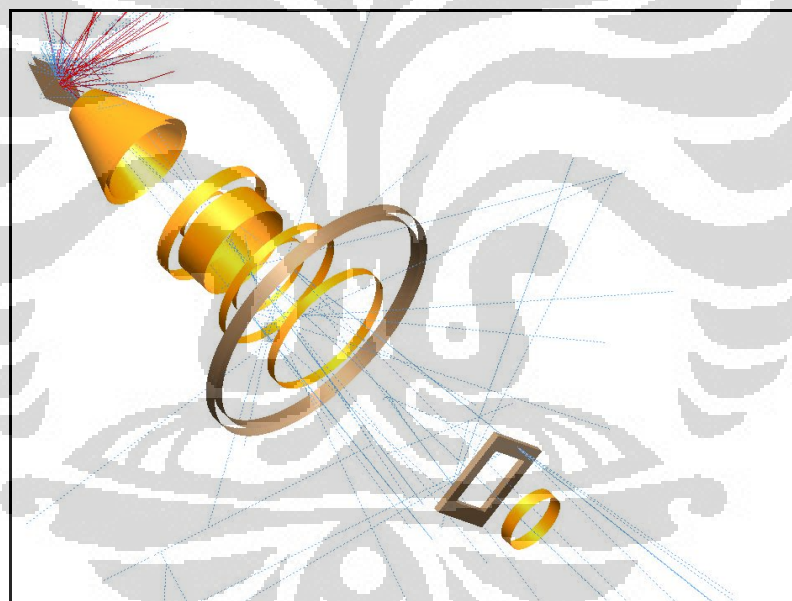
(b)

Gambar 3.2 Hasil pemodelan komponen modul dengan simulasi monte carlo BEAMnrc : (a) modul pertama. (b) modul kedua

Selain hasil pemodelan 2-D seperti pada Gambar 3.2, Pemodelan monte carlo dengan BEAMnrc dapat juga melihat transport partikel, baik elektron maupun foton pada tiap komponen yang dilaluinya pada pemodelan 3-D. Pembuatan model 3-D untuk pesawat sinar-X dilakukan dengan menggunakan EGS_Windows_4 yang dioperasikan pada OS Linux, dengan memasukkan data geometri (.egsgeom) dan data grafik (.egsgph) hasil simulasi monte carlo, seperti terlihat pada gambar 3.3.



(a)



(b)

Gambar 3.3 Pemodelan 3-D BEAMnrc menggunakan EGS_Windows_4 untuk pesawat sinar-X keseluruhan. Elektron(merah). Foton(biru). (a) tampak samping : elektron datang dari kanan menuju anoda yang terletak di bagian kiri dan terjadi penumbukan. (b) tampak depan : elektron dan foton terhambur ke berbagai arah yang mensimulasikan pergerakan elektron dan foton selama simulasi pengukuran pada pesawat sinar-X.

3.2 Pengambilan Data Spektrum menggunakan xcomp5r

Program xcomp5r merupakan kode komputer yang dapat digunakan untuk mendapatkan distribusi spektrum sinar-X. Program xcomp5r tersebut menggunakan pemrograman yang berbasis pada sistem pengoperasian DOS.¹⁰ Distribusi spektrum sinar-X yang didapat memiliki daerah pengaturan tegangan tabung sinar-X pada 20 kV – 150 kV dengan interval 1 keV.¹¹ Spektrum sinar-X yang didapat menggunakan program xcomp5r tersebut merupakan hasil pendekatan empiris. Program xcomp5r digunakan sebagai data pembanding dalam penelitian karena program xcomp5r memiliki keakuratan yang tinggi dalam melakukan perhitungan spektrum relatif. Keakuratan xcomp5r terlihat dengan adanya perbedaan rerata kualitas radiasi antara HVL hasil pengukuran dan HVL teoritis yang kurang dari 3% dengan standar deviasi 3.6%, yang telah ditentukan pada lima tabung sinar-X berbeda dengan menggunakan keseluruhan tegangan tabung.¹⁰

3.3 Pengolahan Data Simulasi BEAMnrc

Hasil keseluruhan pemodelan pesawat sinar-X dengan program EGS/BEAMnrc adalah berupa data *phase space*. Dalam penelitian ini ditekankan pada penggunaan tiga tegangan tabung antara lain 40 kV, 70 kV dan 150 kV, maka data output yang dihasilkan akan berjumlah tiga data *phase space*. BEAMDP dapat digunakan sebagai program pelengkap BEAMnrc untuk menganalisa data *phase space* dan mengekstrak data spektrum sinar-X dalam distribusi fluks energi dan juga distribusi energi efektif /*mean energy*.

3.3.1 Perhitungan Energi Efektif

Perhitungan energi rata-rata dilakukan dengan melakukan perhitungan rata-rata seluruh data energi yang terukur pada daerah sampling sesuai dengan persamaan 3.1

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^N (wt.E)_i}{\sum_{i=1}^N wt_i} \quad (3.1)$$

Dimana w merupakan faktor bobot yang dalam penelitian ini adalah fluks spektrum. Dari persamaan ini akan diperoleh distribusi energi rata-rata terhadap posisi yang dihasilkan berdasarkan simulasi metode Monte Carlo.

3.3.2 Perhitungan Besar FWHM Spektrum Sinar-X

Perhitungan besar FWHM memerlukan data berupa distribusi fluks energi yang dihasilkan oleh BEAMDP. Dengan mendasarkan pada pendekatan fungsi Gaussian, sehingga FWHM Gaussian dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan

$$FWHM \equiv x_+ - x_- = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2.3548\sigma \quad (1.7)$$

FWHM Gaussian yang digunakan dengan persamaan (1.7) menunjukkan kecenderungan bentuk kurva spektrum sinar-X. Dengan menggunakan persamaan tersebut maka akan didapatkan besar FWHM untuk penggunaan tegangan tabung 40 kV, 70 kV, dan 150 kV.

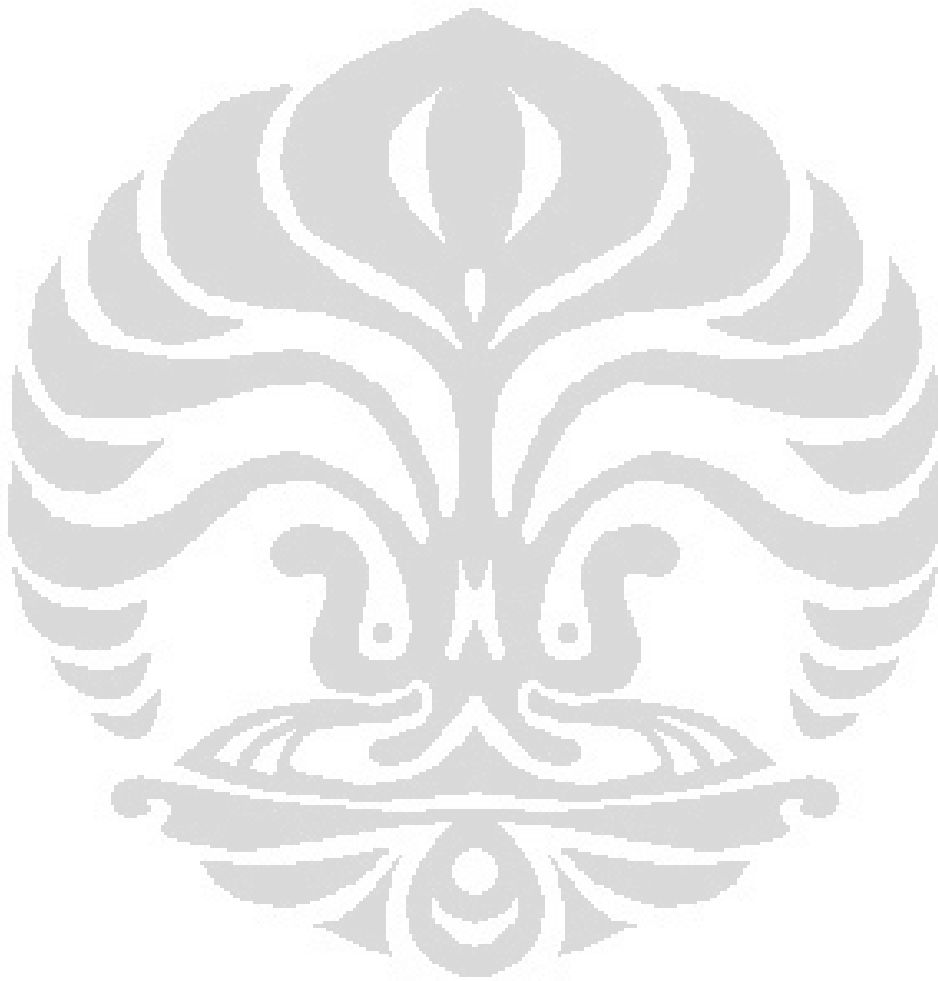
3.3.3 Proses *Smoothing* terhadap spektrum sinar-X

Proses *smoothing* dapat dilakukan pada spektrum sinar-X apabila distribusi fluks energi yang dihasilkan oleh BEAMDP terlihat berfluktuatif. Proses *smoothing* ini dilakukan berdasarkan fungsi *smoothing* yang sesuai. Dalam penelitian ini, fungsi untuk proses *smoothing* yang digunakan merupakan fungsi eksponensial *smoothing* Holt's Trend yang telah terdapat dalam plugin program Gnumeric.³ Persamaan yang sesuai dengan fungsi eksponensial *smoothing* Holt's Trend adalah

$$\begin{aligned} l_t &= \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \gamma (l_t - l_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Fungsi eksponensial *smoothing* ini memanfaatkan *Damping Factor* α serta *Growth Damping Factor* γ . Kedua faktor *damping* ini digunakan untuk meredam atau menghaluskan fluktuasi antara data yang berdekatan. Pengaturan nilai kedua faktor *damping* merupakan faktor yang penting untuk proses *smoothing*. Perlakuan *smoothing* tersebut tidak akan mengubah data secara signifikan

sehingga mengubah data secara keseluruhan. Seperti perlakuan interpolasi terhadap data, *smoothing* hanya menentukan nilai tertentu berdasarkan toleransi dari nilai sesungguhnya. Dengan melakukan pengaturan faktor *damping* dan penyesuaian data hasil *smoothing*, maka akan didapatkan data sesuai yang diperlukan.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penentuan *Mean Energy* pada Spektrum Sinar-X

Berdasarkan keseluruhan spektrum sinar-X dari hasil simulasi monte carlo maupun xcomp5r dapat ditentukan nilai *mean energy* yang merupakan perbandingan energi partikel total terhadap jumlah partikel total pada luasan area yang sama. Pada simulasi monte carlo maupun xcomp5r penentuan *mean energy* penting dilakukan untuk mendapatkan distribusi *fluence* sehingga memungkinkan penentuan karakteristik lain yang diperlukan. Pada simulasi monte carlo, perhitungan *mean energy* dilakukan dengan merata-ratakan seluruh *mean energy* berdasarkan perhitungan BEAMDP. Sedangkan pada xcomp5r dilakukan dengan merata-ratakan energi dan distribusi spektrum. Besar *mean energy* untuk spektrum xcomp5r telah terdapat dalam program tersebut. Pada tabel 4.1 menunjukkan data pada modul pertama simulasi monte carlo dan xcomp5r. *Mean energy* yang didapatkan antara kedua program memiliki perbedaan yang jelas. Hal tersebut dapat terjadi karena simulasi monte carlo menggunakan probabilitas interaksi yang terjadi secara keseluruhan serta foton berenergi rendah tidak dapat teratenuasi dengan baik dengan menggunakan filter inherent Be 3 mm.

Tabel 4.1 *Mean Energy* Simulasi Monte Carlo dan xcomp5r untuk modul pertama

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	<i>Mean Energy</i>		Energi Maksimum	
		xcomp5r (keV)	Monte Carlo (keV)	xcomp5r (keV)	Monte Carlo (keV)
RQR 2	40	14.10	18.97	40	39.90
RQR 5	70	25.70	31.56	70	69.83
RQR 10	150	49.90	67.24	150	149.63

Berbeda dengan modul pertama yang menggunakan inherent filter, modul kedua menggunakan *additional* filter Al. Oleh karena itu terjadi perbedaan *mean energy* antar kedua modul. Besar *mean energy* distribusi spektrum sinar-X untuk tegangan tabung 40 kV, 70 kV serta 150 kV pada modul kedua baik melalui simulasi monte carlo maupun xcomp5r dapat terlihat pada tabel 4.2. Data untuk perhitungan *mean energy* simulasi monte carlo modul kedua dapat terlihat pada lampiran III.

Tabel 4.2 *Mean Energy* Simulasi Monte Carlo dan xcomp5r untuk modul kedua

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	<i>Mean Energy</i>		Energi Maksimum	
		xcomp5r (keV)	Monte Carlo (keV)	xcomp5r (keV)	Monte Carlo (keV)
RQR 2	40	28.1	28.2	40	39.90
RQR 5	70	39.6	39.9	70	69.83
RQR 10	150	63.5	63.8	150	149.63

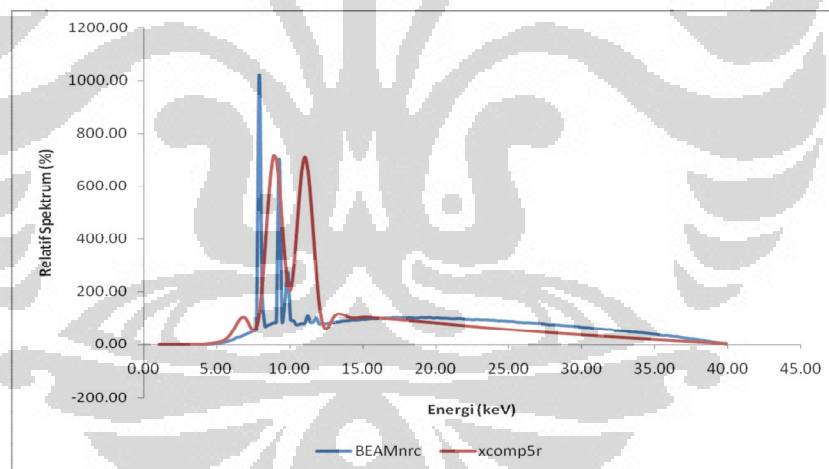
Dengan mengamati *mean energy* pada kedua pembandingan, antara monte carlo dan xcomp5r, terlihat perbedaan yang tidak terlalu signifikan pada modul kedua. *Mean energy* hasil simulasi monte carlo untuk tegangan tabung 40 kV adalah 28.1 lebih mendekati *mean energy* xcomp5r dibandingkan *mean energy* pada tegangan tabung yang lain. Meskipun *mean energy* pada monte carlo lebih besar daripada xcomp5r, namun perbedaan *mean energy* yang relatif kecil tiap RQR menunjukkan monte carlo memiliki akurasi yang hampir sama dengan xcomp5r. Terlihat pada tabel 4.2 *mean energy* hampir terletak pada interval median energi keseluruhan. Oleh karena itu *mean energy* dari keseluruhan tegangan tabung menunjukkan energi efektif yang dimiliki oleh spektrum sinar-X. Perbedaan kurang dari 1 keV energi maksimum xcomp5r dan simulasi monte carlo menunjukkan kesesuaian bentuk spektrum.

4.2 Pemodelan Pesawat Sinar-X beserta Komponen

Simulasi yang telah dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode monte carlo BEAMnrc yang memfokuskan pada penggunaan tegangan tabung sinar-X 40 kV, 70 kV dan 150 kV. Penggunaan besar tegangan tabung tersebut didasarkan untuk mengetahui perbedaan spektrum yang signifikan antar energi.

4.2.1 Pembentukan Spektrum hasil pemodelan sebagai output atau keluaran tabung sinar-X

Pembentukan spektrum sinar-X ini didasarkan pada hasil simulasi monte carlo modul pertama. Hasil spektrum yang keluar dari modul pertama merupakan spektrum sinar-X yang telah melalui filter inherent 3 mm Be. Kedua spektrum pada Gambar 4.1 merupakan spektrum sinar-X hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r dengan pemasangan 3 mm Be untuk RQR 2.



Gambar 4.1 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 40 kV

Pada modul pertama, yang terdiri dari tabung sinar-X, sistem shutter, *shielding* pesawat sinar-X, menunjukkan bahwa spektrum sinar-X yang didapatkan terdiri dari sinar-X karakteristik dan bremsstrahlung. Adanya sinar-X karakteristik hasil simulasi monte carlo ini terlihat dengan adanya sinar-X karakteristik kulit L pada kurva distribusi spektrum sinar-X tersebut. Adanya

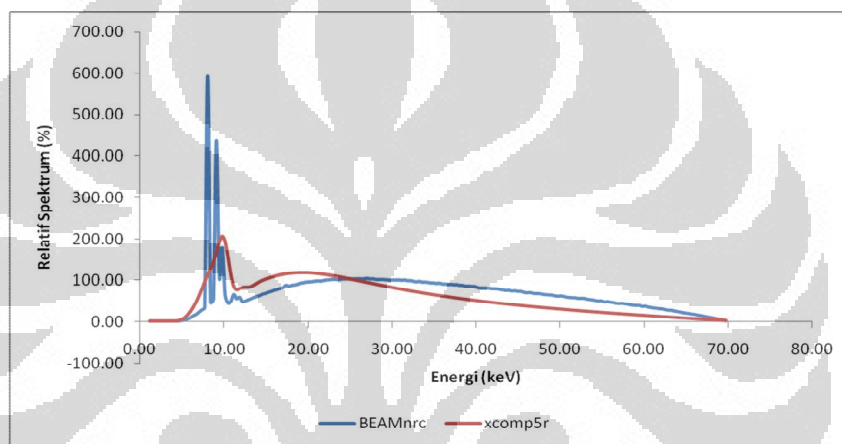
karakteristik kulit L tersebut karena elektron yang datang pada medium menumbuk elektron kulit L pada atom target Tungsten-rhenium melalui proses ionisasi. Kekosongan elektron pada kulit L akibat fotoelektron yang keluar dari atom target katoda akan ditempati oleh elektron dari kulit terluar bersamaan dengan mengemisikan sinar-X karakteristik. Identifikasi kulit L diketahui dengan melihat energi ikatan elektron pada atom target.⁶ Spektrum hasil simulasi monte carlo menunjukkan adanya sinar-X karakteristik L_{α} , L_{β} , serta L_{γ} dengan nilai yang tertera pada tabel 4.3. Berbeda dengan simulasi monte carlo, puncak karakteristik spektrum program xcomp5r hanya terdiri dari karakteristik L_{β} dan L_{γ} pada tegangan tabung 40 kV. Pada tegangan tabung 70 kV dan 150 kV spektrum xcomp5r hanya terdapat satu jenis karakteristik, yaitu L_{γ} untuk 70 kV dan L_{β} untuk 150 kV. Perbedaan sinar-X karakteristik antar kedua simulasi terjadi karena xcomp5r hanya dapat mensimulasikan spektrum sinar-X dengan resolusi 1 keV. Sinar-X karakteristik yang berenergi terlalu dekat satu sama lain akan dianggap menjadi satu jenis sinar-X karakteristik. Elektron dengan energi yang lebih besar bergerak menuju inti atom target tungsten-rhenium dan dibelokkan dengan mengemisikan bremsstrahlung atau radiasi kontinu dengan energi lebih besar dari 10 keV, seperti yang terlihat pada Gambar 4.1.

Tabel 4.3 Sinar-X karakteristik Kulit L beserta energinya

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	sinar-X karakteristik (keV)					
		Monte Carlo			xcomp5r		
		L_{α}	L_{β}	L_{γ}	L_{α}	L_{β}	L_{γ}
RQR 2	40	7.92	9.29	9.87		8.90	11.04
RQR 5	70	8.07	9.11	9.80			9.80
RQR 10	150	8.08	9.57			9.57	

Pada Gambar 4.2 memperlihatkan distribusi spektrum simulasi monte carlo ketika tegangan tabung sinar-X 70 kV diaplikasikan. Pada energi 8-10 keV terdapat sinar-X karakteristik kulit L yang serupa dengan spektrum 40 kV. Sinar-X karakteristik yang terdapat pada spektrum 70 kV hasil monte carlo memiliki

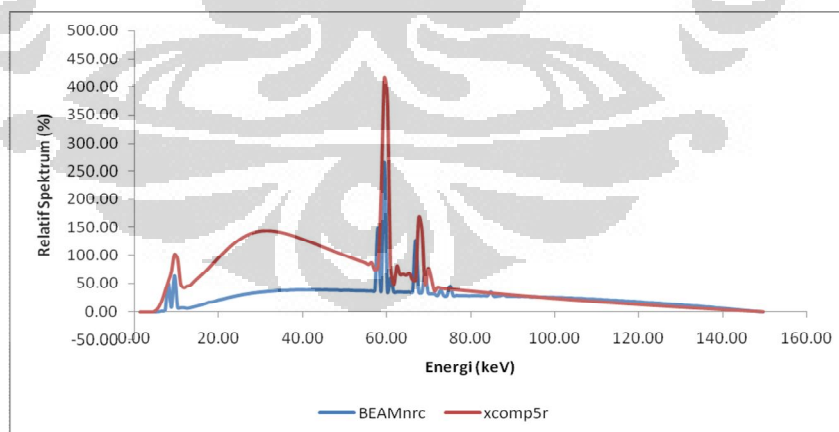
konsistensi terhadap sinar-X karakteristik spektrum 40 kV, yaitu terlihat dengan adanya sinar-X karakteristik L_{α} , L_{β} , dan L_{γ} . Pada hasil simulasi monte carlo terdapat sinar-X karakteristik L_{α} , L_{β} , dan L_{γ} , sedangkan pada spektrum hasil xcomp5r terlihat hanya terdapat satu jenis sinar-X karakteristik, L_{γ} sesuai dengan tabel 4.3. Perbedaan signifikan sinar-X karakteristik pada tegangan 40 kV dan 70 kV dapat terjadi karena xcomp5r hanya dapat mensimulasikan beberapa sinar-X karakteristik antara L_{β} dan L_{γ} . Xcomp5r tidak dapat mensimulasi perhitungan sinar-X karakteristik L_{α} .



Gambar 4.2 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 70 kV

Untuk energi 150 keV terlihat adanya perbedaan dengan spektrum sinar-X energi lainnya. Pada modul pertama simulasi monte carlo terlihat adanya dua jenis sinar-X karakteristik seperti yang terlihat pada Gambar 4.3. Sinar-X karakteristik yang pertama berada pada energi rendah sekitar 8-10 keV seperti pada tegangan 40 kV dan 70 kV yang disebabkan karena transisi elektron dari kulit terluar ke kulit L. Sedangkan sinar-X karakteristik kedua yaitu direpresentasikan dengan sinar-X karakteristik kulit K. Sinar-X karakteristik tersebut dapat terlihat ketika terjadi transisi elektron dari kulit M atau kulit yang lebih luar menuju kulit K karena adanya interaksi pada kulit K oleh elektron yang datang pada atom tersebut yang mengakibatkan elektron pada kulit K terionisasi.¹² Sedangkan pada tegangan

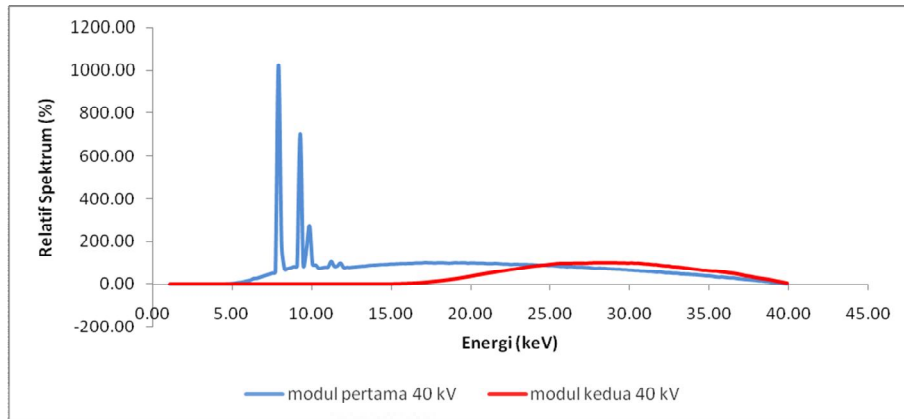
tabung 40 kV dan 70 kV tidak terdapat jenis sinar-X karakteristik ini karena sinar-X karakteristik kulit K memiliki energi yang relatif besar. Energi yang dimiliki oleh foton karakteristik tersebut sebanding dengan selisih kedua tingkat energi yang terlibat. Foton karakteristik K_{β} memiliki energi lebih besar daripada K_{α} karena selisih tingkat energi yang lebih besar. Pada foton karakteristik K_{β} terjadi transisi elektron antara tingkat energi dengan kulit M dengan kulit K. Oleh karena itu selisih tingkat energi lebih besar dibandingkan K_{α} dengan transisi elektron antara kulit L dengan kulit K. Pada semua spektrum terlihat dominasi sinar-X energi rendah karena sinar-X hanya melalui filter inherent 3 mm Be yang memiliki faktor attenuasi rendah dengan nomer atom $Z = 4$ dan $\rho = 1.848 \text{ g/cm}^3$ yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan apabila melewati Al dengan faktor attenuasi lebih besar dengan nomer atom dan densitas yang lebih rapat daripada material Be. Perbedaan bentuk spektrum maupun besar energi sinar-X karakteristik antar simulasi monte carlo dengan xcomp5r untuk RQR 2, RQR 5 dan RQR 10, meskipun tidak signifikan, dapat terjadi karena simulasi monte carlo memasukkan seluruh probabilitas interaksi partikel yang terjadi dalam medium, termasuk partikel elektron, dan hamburan yang mungkin terjadi selama simulasi berlangsung.



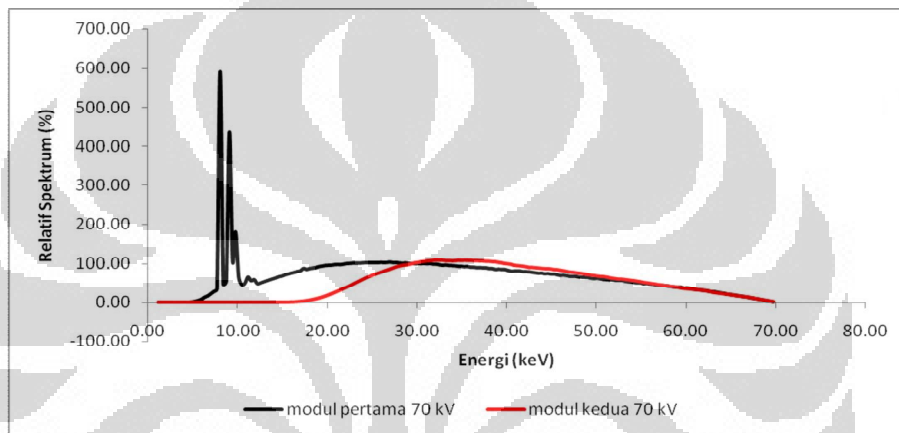
Gambar 4.3 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r untuk modul pertama dengan tegangan tabung sinar-X 150 kV

4.2.2 Pengaruh Pemasangan Filter Tambahan pada Spektrum Sinar-X

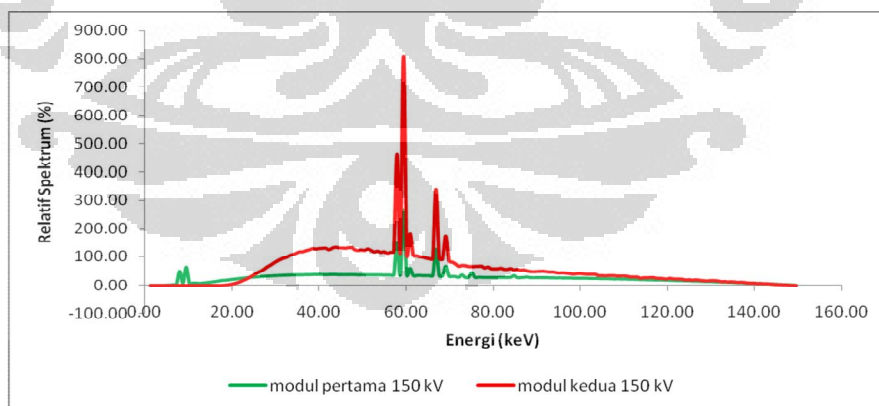
Pemasangan filter tambahan pada simulasi monte carlo dilakukan pada pengaturan modul kedua. Filter tambahan yang digunakan adalah Aluminium dengan nomer atom Z rendah. Ketebalan Al yang digunakan berbeda-beda untuk tegangan tabung sinar-X yang diaplikasikan. Penggunaan ketebalan Al ini didasarkan pada pengukuran RQR berdasarkan TRS No. 457. Sesuai dengan data referensi, pada tegangan tabung sinar-X 40 kV, ketebalan Al yang digunakan adalah 2.7 mm. Dengan ketebalan 2.7 mm Al ini, sinar-X karakteristik kulit L dapat terattenuasi sehingga spektrum yang dihasilkan adalah bremsstrahlung sesuai dengan Gambar 4.4. Begitu pula dengan tegangan tabung sinar-X, diaplikasikan filter tambahan dengan ketebalan 2.93 mm Al sehingga sinar-X karakteristik L-lines dapat terattenuasi terlihat pada Gambar 4.4. Pada tegangan tabung 150 kV, terdapat perbedaan yang signifikan, meskipun telah menggunakan filter tambahan dengan ketebalan 4.26 mm Al, yang terattenuasi hanyalah karakteristik kulit L sedangkan karakteristik kulit K masih tetap ada pada spektrum sinar-X seperti terlihat pada Gambar 4.4. Data yang dipergunakan pada gambar 4.4 merupakan data yang telah dilakukan *smoothing* untuk spektrum 40 kV dan 70 kV. Pengaruh pemasangan filter tambahan Al dengan ketebalan yang berbeda untuk tegangan tabung terlihat dengan tidak adanya foton karakteristik berenergi rendah, yaitu foton karakteristik kulit L. Hal ini disebabkan foton berenergi rendah dibawah 20 keV akan terattenuasi dengan ketebalan Al tersebut, sehingga hanya foton berenergi yang lebih tinggi dapat melewati filter Al. Energi rendah yang terattenuasi disertai penambahan filter akan menambahkan kualitas radiasi yaitu *mean energy* seperti pada tabel 4.1 dan tabel 4.2. *Mean energy* yang didapat antar kedua modul menunjukkan penggunaan filter akan menambahkan kualitas radiasi RQR.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4 Kurva Distribusi Spektrum Hasil simulasi monte carlo untuk modul kedua dengan tegangan tabung sinar-X. (a) : 40 kV dengan ketebalan 2.7 mm Al. (b) : 70 kV dengan ketebalan 2.93 mm Al. (c) : 150 kV dengan ketebalan 4.26 mm Al

4.3 Perbandingan Spektrum Sinar-X BEAMnrc dan xcomp5r dengan Pemasangan Filter Aluminium

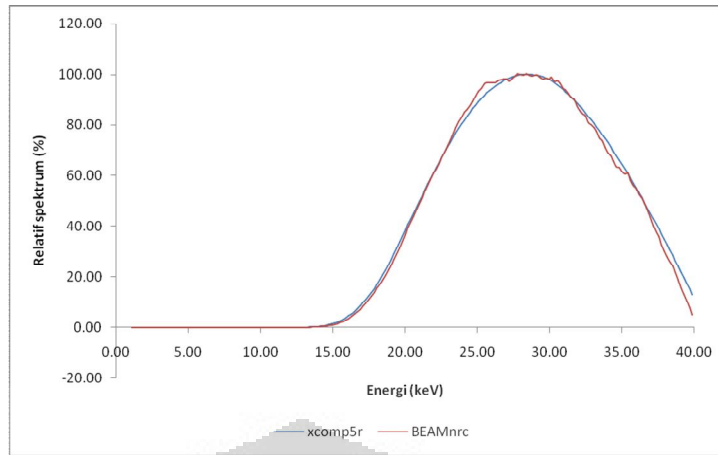
Simulasi Monte Carlo merupakan simulasi dengan tingkat akurasi mendekati hasil pengukuran karena perhitungan monte carlo memasukkan semua probabilitas interaksi yang terjadi dalam suatu medium. Evaluasi terhadap hasil simulasi Monte Carlo spektrum sinar-X merupakan hal yang penting, oleh karena itu dilakukan perbandingan dengan kode komputer yang memiliki tingkat akurasi tinggi untuk melakukan perhitungan spektrum relatif. Spektrum hasil simulasi program BEAMnrc dibandingkan dengan program xcomp5r untuk melihat konsistensi hasil simulasi kedua program yang digunakan. Program xcomp5r merupakan kode komputer berbasis pemrograman BASIC pada lingkungan OS DOS.¹⁰ Program ini memungkinkan perhitungan spektrum sinar-X dengan interval 1 keV untuk tegangan tabung dari 20 kV hingga 150 kV.¹¹

Dengan memasukkan parameter yang sesuai perhitungan simulasi monte carlo ke dalam xcomp5r, telah didapatkan spektrum sinar-X untuk energi 40 keV, 70 keV serta 150 keV, pada Gambar 4.5. Spektrum sinar-X xcomp5r terlihat lebih halus daripada spektrum simulasi monte carlo. Hal ini disebabkan karena pada metode monte carlo simulasi didasarkan oleh generator bilangan acak sehingga spektrum terlihat berfluktuatif akibat ketidakpastian dalam proses pembentukan bilangan acak dalam simulasi. Hasil xcomp5r diperoleh dari pendekatan empiris. Hasil simulasi antar xcomp5r dan monte carlo memiliki kesesuaian bentuk spektrum. Pemasangan filter tambahan pada simulasi monte carlo dan xcomp5r menyebabkan spektrum foton karakteristik kulit L hilang. Dengan ketebalan 2.7 mm Al, sinar-X karakteristik pada tegangan tabung 40 kV saling berhimpit seperti pada gambar 4.5 (a), mengalami attenuasi sehingga sinar-X energi tinggi menjadi dominan.

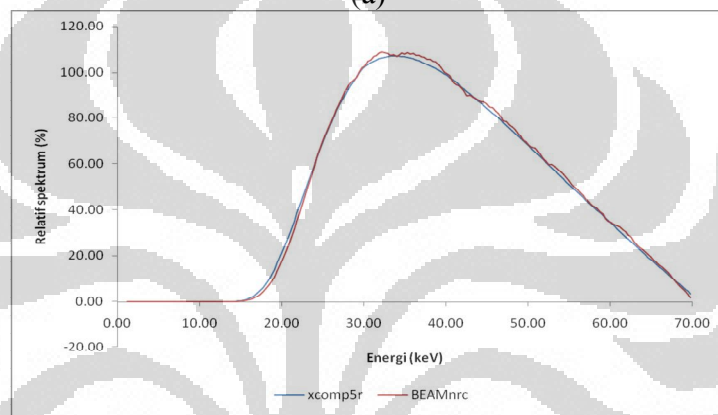
Tabel 4.4 Sinar-X karakteristik Kulit K beserta energinya

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	Sinar-X Karakteristik (keV)						
		Monte Carlo				xcomp5r		
		$K\alpha_2$	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$K\beta_2$	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$K\beta_2$
RQR 2	40							
RQR 5	70							
RQR 10	150	57.99	59.48	66.93	69.17	59.48	67.68	69.91

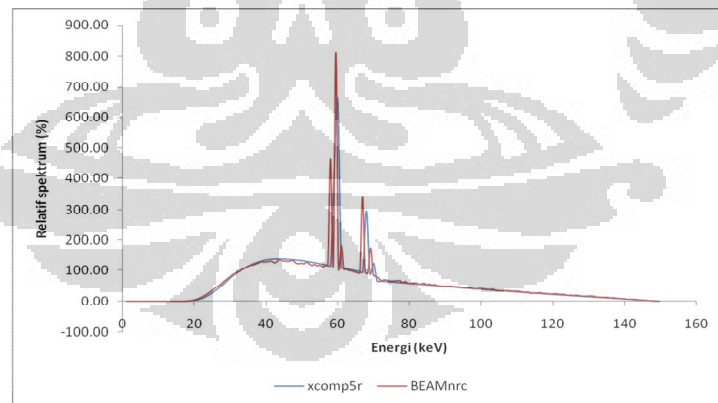
Pada tegangan tabung 70 kV dan 150 kV terlihat spektrum simulasi BEAMnrc dan xcomp5r memiliki konsistensi yang baik. Pada penggunaan tegangan tabung sebesar 70 kV, dilakukan perbandingan antar xcomp5r dan monte carlo. Hasil yang didapat menunjukkan kesesuaian monte carlo terhadap evaluasi xcomp5r yang menjelaskan bahwa spektrum sinar-X hasil monte carlo mendekati spektrum yang tepat terlihat pada gambar 4.5 (b). Perbedaan energi efektif antara simulasi monte carlo maupun xcomp5r untuk tegangan tabung 40 kV, 70 kV dan 150 kV terbilang rendah kurang dari 1 keV. Pada tegangan tabung 150 kV pada spektrum hasil simulasi BEAMnrc terlihat beberapa puncak, yang menunjukkan sinar-X karakteristik kulit K, seperti pada tabel 4.4. Perbedaan energi tiap foton karakteristik antara hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r kurang dari 1 keV. Hal tersebut menunjukkan kesesuaian spektrum antar keduanya. Perbedaan yang signifikan pada kurva spektrum antara sinar-X karakteristik simulasi monte carlo dan xcomp5r adalah pada sinar-X karakteristik $K\alpha_2$. Foton karakteristik $K\alpha_2$ dapat disimulasikan dengan metode monte carlo, sedangkan foton $K\alpha_2$ tidak dapat disimulasikan dengan xcomp5r.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 Kurva Spektrum sinar-X simulasi Monte Carlo dan xcomp5r (a) tegangan tabung 40 kV setelah dilakukan proses *smoothing* untuk monte carlo menggunakan Gnumeric; (b) tegangan tabung 70 kV setelah dilakukan proses *smoothing* untuk monte carlo menggunakan Gnumeric; (c) tegangan tabung 150 kV tanpa *smoothing*.

4.4 Penentuan FWHM pada Spektrum Sinar-X

FWHM merupakan salah satu karakteristik dalam penentuan kualitas radiasi RQR yang menunjukkan kecenderungan bentuk spektrum, dimana nilai FWHM Gaussian yang mendekati nilai satu menunjukkan spektrum diskrit sehingga spektrum lebih mudah direspon oleh detektor. Untuk mendapatkan besar FWHM Gaussian, maka perlu didapatkan standar deviasi dari keseluruhan *fluence* untuk tiap energi. Dengan menggunakan standar deviasi σ dari distribusi *fluence*, sesuai dengan persamaan (1.7), maka didapatkan FWHM Gaussian spektrum untuk tiap energi.

Tabel 4.5 FWHM Gaussian berdasarkan Spektrum Sinar-X simulasi Monte Carlo dan xcomp5r

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	Standar Deviasi (σ)		FWHM Gaussian	
		xcomp5r	Monte Carlo	xcomp5r	Monte Carlo
RQR 2	40	0.389	0.387	0.918	0.916 \pm 0.22
RQR 5	70	0.371	0.367	0.873	0.868 \pm 0.57
RQR 10	150	0.328	0.320	0.773	0.773 \pm 0.06

Berdasarkan tabel 4.5 terlihat nilai FWHM Gaussian simulasi monte carlo mendekati nilai FWHM berdasarkan xcomp5r. Dengan tegangan tabung sinar-X sebesar 40 kV FWHM Gaussian yang didapat lebih mendekati nilai ideal yaitu 0.912 untuk simulasi monte carlo dan 0.918 untuk perhitungan spektrum xcomp5r. Hal ini sesuai pula dengan bentuk spektrum yang lebih simetris dan rapat dibandingkan spektrum 70 kV pada Gambar 4.5. Besar FWHM Gaussian pada tegangan 150 kV menunjukkan nilai yang hampir mendekati sama. Hal ini disebabkan spektrum RQR 10 hasil simulasi monte carlo yang terdiri dari sinar-X karakteristik dan radiasi kontinu, telah dihilangkan pada bagian sinar-X karakteristik sehingga spektrum lebih membentuk fungsi Gaussian. Kekosongan *fluence* pada beberapa energi digantikan dengan interpolasi pada masing-masing

energi dan dilakukan *smoothing* pada spektrum tersebut. Besar FWHM Gaussian simulasi monte carlo dengan RQR 10 yang terlihat pada tabel 4.5 merupakan hasil pengambilan angka penting dari FWHM yang didapat, sehingga besar FWHM Gaussian monte carlo serupa dengan FWHM Gaussian berdasarkan xcomp5r.

Semakin besar tegangan tabung sinar-X yang digunakan semakin rendah nilai FWHM Gaussian yang didapat. Semakin besar beda tegangan yang diaplikasikan pada tabung menghasilkan energi elektron yang lebih besar, sehingga energi foton yang dikeluarkan akan meningkat. Dikarenakan energi sebanding dengan tegangan, maka apabila tegangan yang lebih besar diaplikasikan pada tabung sinar-X maka *range* energi akan meningkat sehingga kurva distribusi spektrum menjadi lebih lebar, seperti terlihat pada tabel dalam lampiran IV. Berdasarkan tabel pada lampiran IV, FWHM Gaussian spektrum yang semakin rendah menunjukkan lebar FWHM energi spektrum yang semakin meningkat.

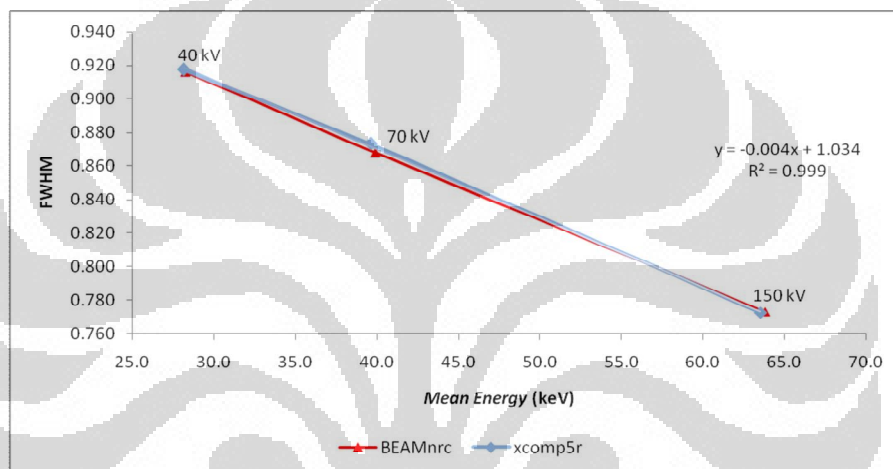
4.4.1 Penentuan Hubungan *Mean Energy* terhadap besar FWHM Gaussian spektrum sinar-X

Berdasarkan data simulasi monte carlo dan xcomp5r, telah didapatkan besar FWHM Gaussian untuk tiap tegangan tabung yang digunakan, oleh karena itu dapat ditentukan hubungan antara *mean energy* foton terhadap FWHM Gaussian spektrum sinar-X tersebut.

Tabel 4.6 *Mean Energy* distribusi fluks foton dan FWHM Gaussian spektrum sinar-X

Kualitas radiasi	Tegangan tabung (kV)	<i>Mean Energy</i>		FWHM Gaussian	
		xcomp5r (keV)	Monte Carlo (keV)	xcomp5r	Monte Carlo
RQR 2	40	28.1	28.2	0.918	0.916
RQR 5	70	39.6	39.9	0.873	0.868
RQR 10	150	63.5	63.8	0.773	0.773

Untuk memudahkan pengamatan hubungan antara *mean energy* dan FWHM Gaussian dapat terlihat pada Gambar 4.6. Terlihat dengan meningkatnya energi efektif spektrum sinar-X akan membuat bentuk spektrum lebih melebar atau lebar FWHM semakin besar dan spektrum terlihat lebih tidak simetris, terlihat pada gambar pada lampiran IV, sehingga nilai FWHM Gaussian akan semakin rendah.



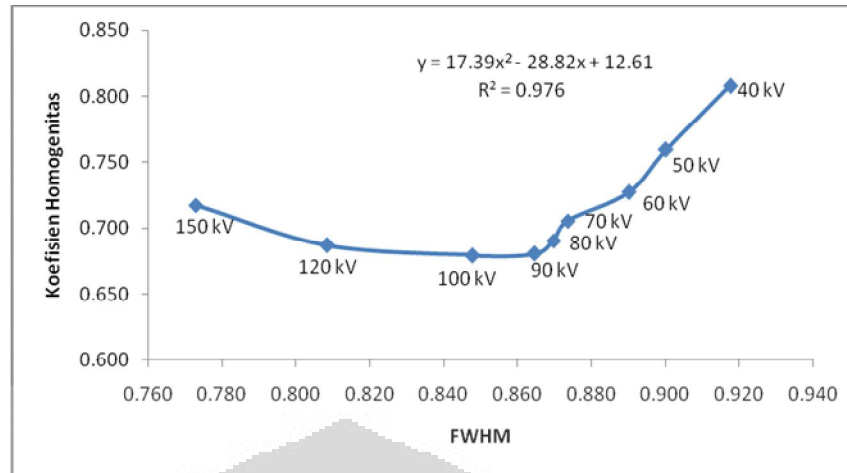
Gambar 4.6 Hubungan *Mean Energy* terhadap FWHM Spektrum Sinar-X

4.5 Penentuan Korelasi Koefisien Homogenitas terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X

Berdasarkan TRS No. 457 koefisien homogenitas merupakan perbandingan antara HVL pertama terhadap HVL kedua, yang merupakan fungsi energi. Sedangkan untuk FWHM yang juga merupakan fungsi energi, maka ada kemungkinan terjadinya hubungan antara koefisien homogenitas dan FWHM. Dengan menggunakan FWHM Gaussian dan koefisien homogenitas pada xcomp5r akan dapat ditentukan koefisien homogenitas spektrum hasil simulasi monte carlo. Data spektrum sinar-X berdasarkan program xcomp5r dapat dilihat pada lampiran V.

4.5.1 Penentuan hubungan homogenitas dan FWHM Gaussian berdasarkan data xcomp5r

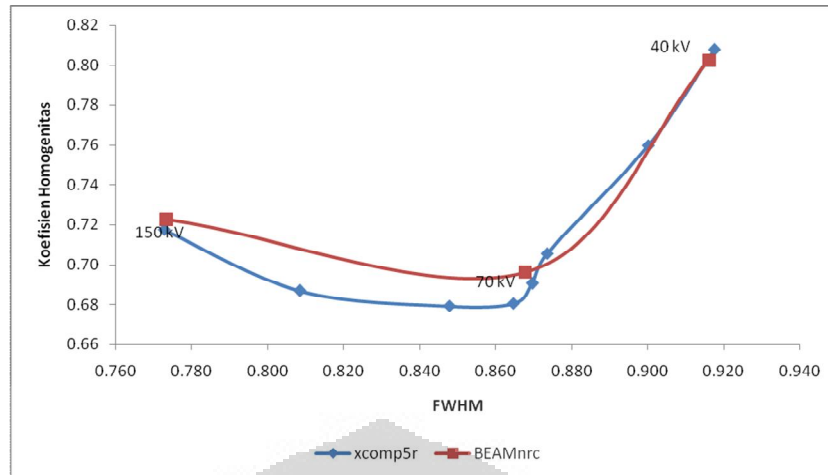
Selain menghasilkan distribusi *fluence* foton, xcomp5r juga dapat menghasilkan nilai HVL pertama dan HVL kedua untuk menentukan koefisien homogenitas (h), sesuai dengan persamaan (1.8). Berdasarkan perhitungan menggunakan xcomp5r untuk tegangan tabung dari 40 kV hingga 150 kV maka koefisien homogenitas spektrum xcomp5r mendekati data referensi pada TRS No. 457.¹⁴ Data tersebut dapat terlihat dalam tabel pada lampiran VI. Berdasarkan data koefisien homogenitas terhadap FWHM Gaussian program xcomp5r terlihat hubungan yang tidak linier sehingga sulit untuk memprediksi koefisien homogenitas dari bentuk spektrum sinar-X monte carlo. Akan relatif lebih mudah apabila dibuat kurva hubungan koefisien homogenitas terhadap FWHM Gaussian. Untuk menentukan koefisien homogenitas monte carlo, maka dilakukan metode pendekatan grafik untuk hubungan koefisien homogenitas terhadap FWHM Gaussian. Grafik yang didapat merupakan data berdasarkan perhitungan program xcomp5r seperti terlihat pada Gambar 4.7. Berdasarkan kurva pada Gambar 4.7 hubungan yang terjadi lebih cenderung tepat menggunakan fungsi polinomial orde dua. Persamaan yang didapatkan berdasarkan metode pendekatan grafik ini dapat digunakan untuk menentukan koefisien homogenitas spektrum dari tiap energi hasil simulasi monte carlo.



Gambar 4.7 Kurva Hubungan FWHM Gaussian spektrum terhadap Koefisien Homogenitas xcomp5r

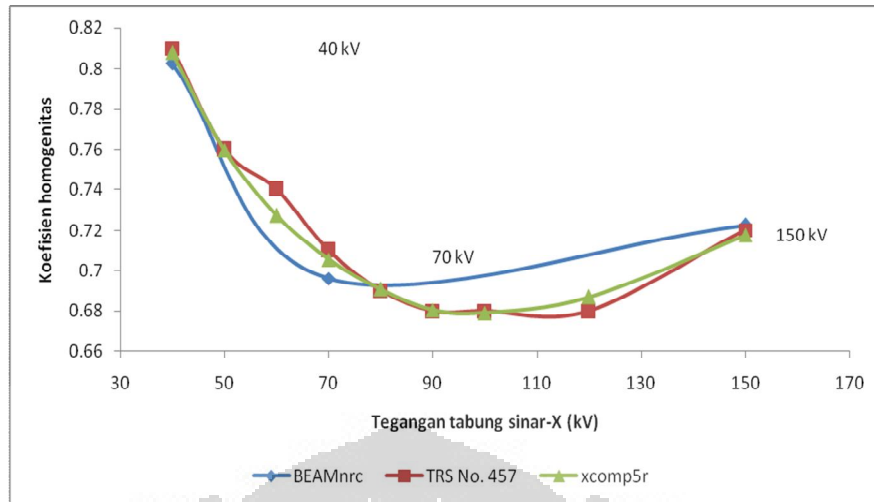
4.5.2 Korelasi homogenitas monte carlo terhadap besar FWHM spektrum sinar-X

Berdasarkan metode pendekatan grafik yang telah dilakukan untuk spektrum hasil program xcomp5r, persamaan kurva tersebut dapat digunakan untuk data simulasi monte carlo. Dengan memasukkan besar FWHM Gaussian spektrum hasil simulasi monte carlo pada persamaan kurva tersebut, maka telah didapatkan koefisien homogenitas untuk tiap energi. Hasil perhitungan koefisien homogenitas simulasi monte carlo dapat dilihat pada tabel dalam lampiran VII. Dari tabel koefisien homogenitas simulasi monte carlo mendekati hasil perhitungan xcomp5r maupun berdasarkan data referensi pada TRS No. 457. Koefisien homogenitas untuk RQR 2 adalah 0.803 dengan ketidakpastian terhadap xcomp5r 0.647 % sedangkan terhadap TRS No. 457 memiliki ketidakpastian 0.903 %. Pada RQR 5 koefisien homogenitas spektrum yang didapat adalah 0.696 dan mempunyai ketidakpastian terhadap xcomp5r 1.355 % dan terhadap TRS No. 457 adalah 1.972 %. Ketidakpastian terhadap xcomp5r maupun TRS No. 457 relatif lebih kecil terjadi ketika RQR 10 digunakan. Dengan RQR 10, koefisien homogenitas yang diperoleh sebesar 0.723 mendekati hasil perhitungan xcomp5r 0.717. Hal ini disebabkan bentuk spektrum keseluruhan radiasi karakteristik dan kontinu yang hampir berhimpit antara spektrum monte carlo dan xcomp5r.



Gambar 4.8 Kurva hubungan FWHM Gaussian terhadap koefisien homogenitas berdasarkan simulasi monte carlo dan xcomp5r.

Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa perubahan FWHM Gaussian tidak sebanding dengan koefisien homogenitas yang didapatkan. Tidak hanya berdasarkan simulasi monte carlo dan xcomp5r, tetapi juga berdasarkan referensi pada IAEA TRS No. 457 koefisien homogenitas akan semakin meningkat untuk tegangan tabung yang lebih besar dari 100 kV seperti yang terlihat dalam perbandingan hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r dengan TRS No. 457 pada Gambar 4.9. Hal ini disebabkan karena perhitungan FWHM Gaussian yang digunakan adalah fungsi linier yang sebanding dengan besar standar deviasi dari spektrum, sehingga puncak karakteristik spektrum harus dihilangkan. Sedangkan pada perhitungan koefisien homogenitas yang merupakan perbandingan antara HVL_1 dan HVL_2 memasukkan puncak karakteristik spektrum dalam perhitungan.



Gambar 4.9 Perbandingan homogenitas dari beberapa referensi terhadap tegangan tabung sinar-X

Selain hal tersebut hubungan yang terjadi antara koefisien homogenitas terhadap FWHM spektrum dapat pula disebabkan oleh radiasi karakteristik dan radiasi kontinu pada tiap spektrum. Pada tegangan lebih kecil dari atau sama dengan 100 kV hampir keseluruhan spektrum terlihat lebih mengarah pada kurva bremsstrahlung, terlihat pada data spektrum perbandingan xcomp5r dalam lampiran V. Dengan menggunakan tegangan tabung yang semakin meningkat hingga 100 kV, kurva bremsstrahlung semakin melebar sehingga FWHM Gaussian dan koefisien homogenitas menurun serta lebar FWHM spektrum akan meningkat. Dengan menggunakan tegangan tabung lebih besar dari 100 kV hingga 150 kV, kemunculan puncak karakteristik memiliki pengaruh dalam koefisien homogenitas yang didapatkan. Oleh karena itu, dengan tegangan lebih besar dari 100 kV hingga 150 kV, meskipun FWHM Gaussian semakin rendah dan lebar FWHM spektrum semakin besar, koefisien homogenitas yang didapat akan meningkat, seperti pada gambar 4.9.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Permodelan pesawat sinar-X beserta komponennya untuk mendapatkan kualitas radiasi dengan menggunakan simulasi monte carlo BEAMnrc telah berhasil dilakukan dalam penelitian ini. Keberhasilan permodelan tersebut dapat diketahui dengan mendapatkan spektrum sinar-X untuk tiap tegangan tabung 40 kV, 50 kV serta 150 kV. Spektrum sinar-X yang didapatkan telah dilakukan perbandingan terhadap xcomp5r, program berbasis DOS dalam menentukan distribusi spektrum sinar-X. Pengaturan pada xcomp5r disamakan dengan pengaturan pada simulasi monte carlo. Proses smoothing data dilakukan untuk mengurangi fluktuasi data akibat ketidakpastian dalam simulasi. Proses smoothing dilakukan untuk spektrum 40 kV dan 70 kV sehingga spektrum sinar-X monte carlo dan xcomp5r memiliki kurva yang berhimpit dengan selisih energi antar kurva mendekati 2 keV.

Selain bentuk spektrum, *mean energy* hasil permodelan monte carlo menunjukkan hasil yang mendekati *mean energy* xcomp5r yang telah didapatkan dalam penelitian ini. Hal ini dibuktikan dengan dilakukannya perbandingan *mean energy* akhir hasil simulasi monte carlo terhadap *mean energy* hasil perhitungan xcomp5r dan sekaligus melihat beda *mean energy* antar keduanya, yaitu sekitar 0.1 – 0.3 keV. Berdasarkan hasil penelitian terdapat kesesuaian hasil dengan teori dasar, bahwa pemasangan filter dapat menambahkan kualitas radiasi RQR, yaitu dengan melihat *mean energy* antara modul pertama dengan modul kedua. Metode monte carlo memberikan hasil simulasi yang sesuai dengan teori.

Besar FWHM Gaussian hasil simulasi monte carlo memiliki kesesuaian dengan FWHM xcomp5r, khususnya pada tegangan tabung 150 kV. Hubungan linier $Y = -0.004X + 1.034$ berlaku pada perubahan FWHM Gaussian terhadap energi efektif spektrum. Semakin besar energi efektif yang digunakan maka

semakin FWHM Gaussian semakin rendah dan lebar FWHM spektrum akan meningkat. Adapun beda FWHM Gaussian hasil simulasi monte carlo dengan xcomp5r relatif kecil sekitar 0.002 – 0.005.

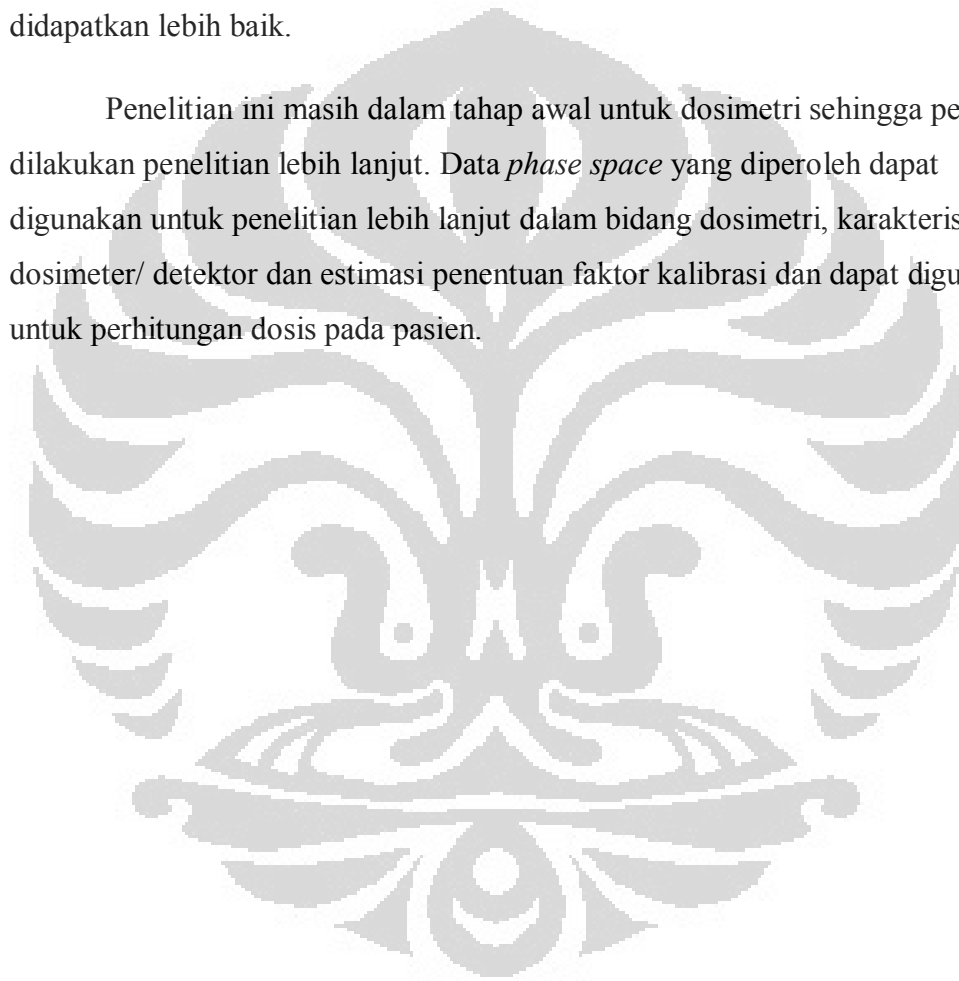
Metode pendekatan grafik untuk mendapatkan koefisien homogenitas spektrum simulasi monte carlo berhasil dilakukan. Metode pendekatan grafik dilakukan berdasarkan penggunaan data xcomp5r, yaitu FWHM Gaussian dan koefisien homogenitas. Dari metode tersebut didapatkan persamaan kurva untuk penghitungan koefisien homogenitas monte carlo yang merupakan fungsi polinomial adalah sebesar $Y = 17.39X^2 - 28.82X + 12.61$. Koefisien homogenitas monte carlo hasil perhitungan dengan persamaan kurva tersebut menunjukkan kesesuaian dengan hasil perhitungan xcomp5r yang merupakan perbandingan HVL_1 dan HVL_2 . Hal ini membuktikan simulasi monte carlo memiliki tingkat keakuratan yang tinggi. Adapun koefisien homogenitas simulasi monte carlo berturut-turut adalah 0.803, 0.696, dan 0.723. Dengan FWHM spektrum simulasi monte carlo yang telah didapatkan, korelasi yang terjadi antara koefisien homogenitas terhadap FWHM spektrum lebih cenderung pada tegangan tabung yang digunakan. Dalam RQR, untuk 40 – 100 kV, koefisien homogenitas akan semakin rendah ketika FWHM Gaussian semakin rendah dan lebar FWHM semakin meningkat. Pada tegangan lebih besar dari 100 kV hingga 150 kV, koefisien homogenitas akan meningkat meskipun lebar FWHM spektrum semakin besar dan FWHM Gaussian yang semakin kecil. Hubungan antara koefisien homogenitas terhadap FWHM dapat disebabkan oleh keberadaan peak karakteristik pada spektrum sinar-X yang mempengaruhi distribusi foton.

Perbedaan antara hasil simulasi monte carlo dan xcomp5r dalam menentukan mean energy, FWHM, maupun koefisien homogenitas dapat disebabkan karena keterbatasan xcomp5r dalam menghitung spektrum dengan resolusi 1 keV. Perbandingan hasil simulasi monte carlo dengan TRS No. 457 menunjukkan bahwa koefisien homogenitas TRS No. 457 tidak didasarkan dari perhitungan FWHM spektrum.

5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan permodelan pesawat sinar-X dengan spesifikasi tabung sinar-X dan komponen yang lebih terperinci sehingga hasil yang didapatkan lebih optimal. Disarankan penggunaan teknik variasi reduksi pada BEAMnrc dilakukan lebih baik lagi. Selain itu, disarankan pula untuk melakukan penghitungan HVL_1 maupun HVL_2 untuk tiap tegangan tabung, sehingga memungkinkan koefisien homogenitas yang didapatkan lebih baik.

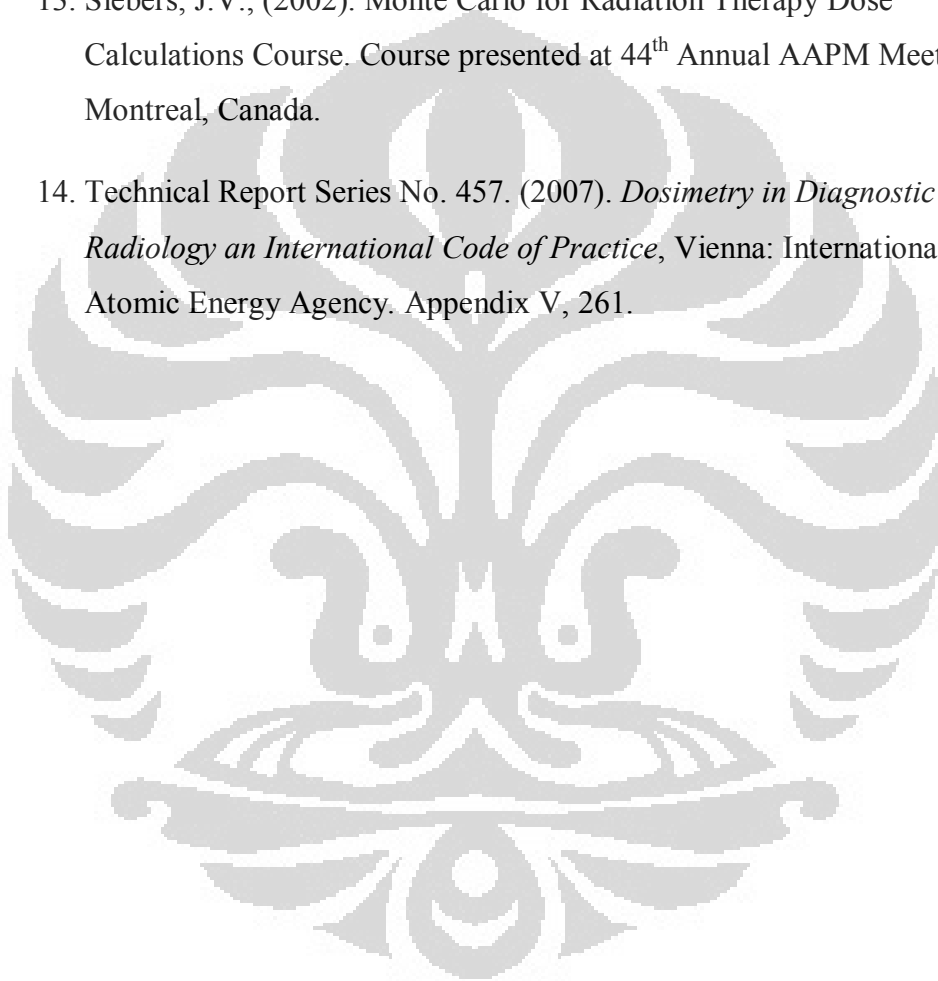
Penelitian ini masih dalam tahap awal untuk dosimetri sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Data *phase space* yang diperoleh dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut dalam bidang dosimetri, karakterisasi dosimeter/ detektor dan estimasi penentuan faktor kalibrasi dan dapat digunakan untuk perhitungan dosis pada pasien.



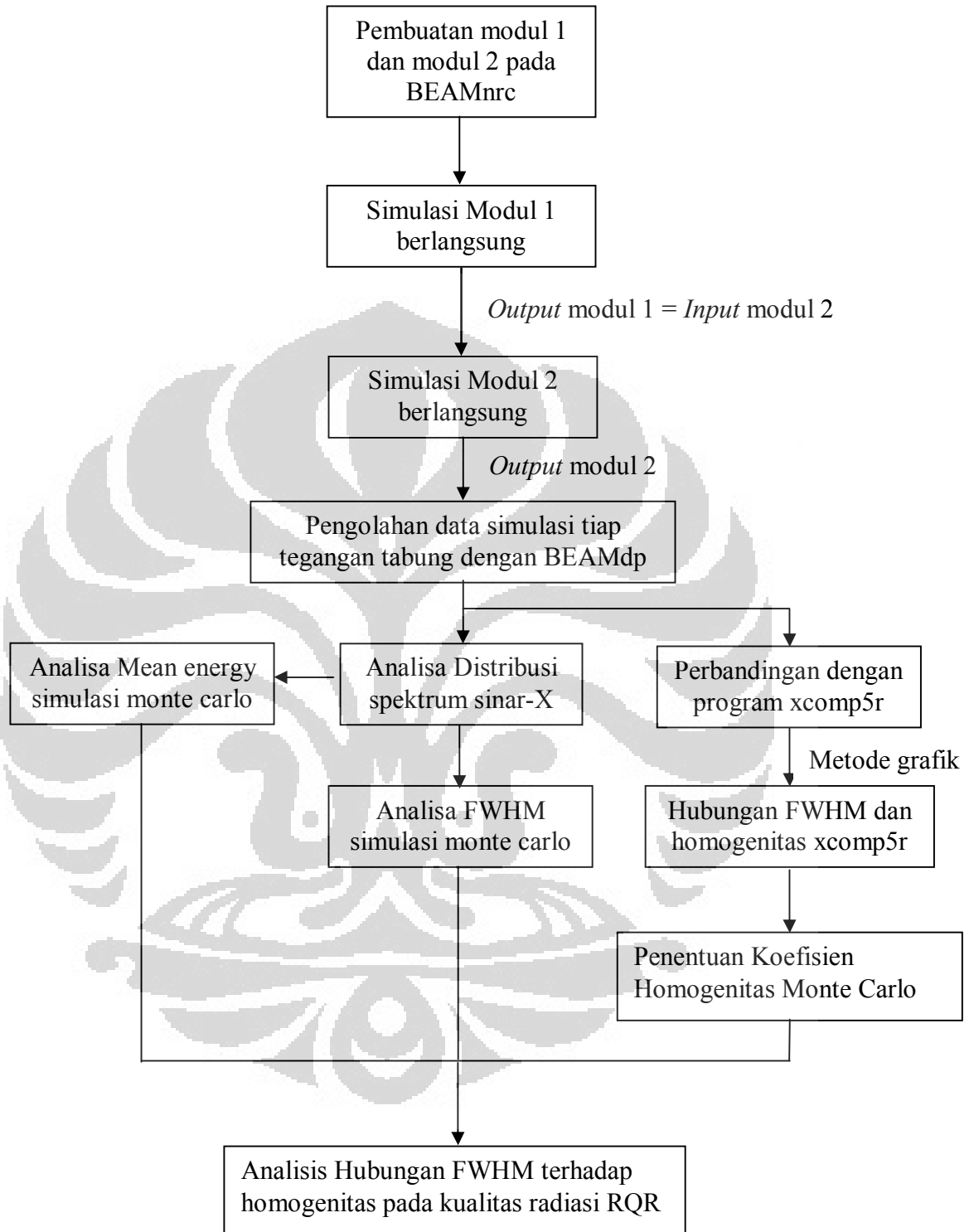
DAFTAR ACUAN

1. Attix, F. H., (2004). *Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry*. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Chapter 7, 125 – 129.
2. Attix, F. H., (2004). *Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry*. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Chapter 9, 203 – 253.
3. Custer, A., et al. (2007). *The Gnumeric Manual* (Version 1.8) Chapter 6 - Holt's Trend Corrected Exponential Smoothing.
4. Full Width at Half Maximum.
http://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum (13 Maret 2010, pukul 10.24 WIB)
5. Gaussian Function. <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html> (22 April 2010, pukul 13.54 WIB)
6. International Atomic Energy Agency. (2005). *Training Material on Radiation Protection in Diagnostic and Interventional Radiology*. Vienna : IAEA.
7. Machenschalk, et al. (1978). X-ray Target. United States Patent. 4.090.103.
8. Maniquis, V. L., (2006). *Monte Carlo Dose Verification Of An X-Ray Beam In A Virtual Phantom*. Georgia: Georgia Institute of Technology.
9. Metcalfe, P., Kron, T., dan Hoban, P. (2007). *The Physics of Radiotherapy X-Rays and Electrons*. Madison – Wisconsin: Medical Physics Publishing. Chapter 10, 621 – 642.
10. Meyer, P. et al. (2004). *Evaluation Of The Use Of Six Diagnostic X-ray Spectra Computer Codes*. British Journal of Radiology, 77, 224-230.

11. Nowotny R, Hvfcr A. (1985). *Ein Programm fur die Berechnung von diagnostischen Roentgenspektren. Fortschr Roentgenstr.* 9, 142-685.
(Xcomp5r can be downloaded at <ftp://ftp.bmtp.akh-wien.ac.at/BMTP/xray/xcomp5r.zip>)
12. Rogers, D.W.O, et al. (2006). BEAMnrc Users Manual. Canada: National Research Council of Canada.
13. Siebers, J.V., (2002). Monte Carlo for Radiation Therapy Dose Calculations Course. Course presented at 44th Annual AAPM Meeting, Montreal, Canada.
14. Technical Report Series No. 457. (2007). *Dosimetry in Diagnostic Radiology an International Code of Practice*, Vienna: International Atomic Energy Agency. Appendix V, 261.



Lampiran I : Bagan Kerja



Lampiran II : Perhitungan Densitas untuk Data Material PEGS4 dalam simulasi monte carlo

A. Molybdenum – Tungsten *alloy* sebagai holder utama target

Persentase bobot untuk tungsten (W) adalah 5 % sedangkan persentase bobot untuk Molybdenum (Mo) adalah 95 %.

Diketahui : $\rho_{Mo} = 10.22 \text{ g/cm}^3$

$\% Mo = 5 \%$

$\rho_W = 19.3 \text{ g/cm}^3$

$\% W = 95 \%$

$BM Mo = 42 \text{ g/mol}$

$BM W = 74 \text{ g/mol}$

Diasumsikan persentase bobot total menyatakan massa total Mo – W alloy sehingga massa Mo adalah 5 g, sedangkan massa W adalah 95 g.

$$mol Mo = 95g \cdot \frac{mol}{42g} = 2.26 \text{ mol}$$

$$mol W = 5g \cdot \frac{mol}{74g} = 0.06 \text{ mol}$$

$$Mo : W = 2.26 : 0.06 = 37.67 : 1$$

$$\begin{aligned} BM alloy &= n_W \cdot Ar_W + n_{Mo} \cdot Ar_{Mo} \\ &= 1 \cdot \left(74 \frac{g}{mol} \right) + 37.67 \cdot \left(42 \frac{g}{mol} \right) \\ &= 1656.14 \frac{g}{mol} \end{aligned}$$

Diasumsikan bahwa mol yang terkandung dalam alloy sebesar 1 mol, sehingga

Massa total alloy dengan 1 mol adalah 1656.14 g.

Sesuai dengan hukum kekekalan massa :

(lanjutan)

$$\begin{aligned}m_{total} &= m_W + m_{Mo} && ; Mo : W = 37.67 : 1 \\ &= x + 37.67x && ; \frac{m_{Mo}}{m_W} = \frac{37.67}{1} \\ 1656.14 &= 38.67x && ; m_{Mo} = 37.67 m_W \\ x &= 48.827g && ; m_W = x\end{aligned}$$

Maka dapat ditentukan volume tiap unsure dalam alloy dengan perhitungan sebagai berikut

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho} \\ V_W &= \frac{m_W}{\rho_W} = \frac{48.827}{19.3} = 2.219cm^3 \\ V_{Mo} &= \frac{m_{Mo}}{\rho_{Mo}} = \frac{48.827(37.67)}{10.22} = 157.858cm^3 \\ V_{total} &= V_W + V_{Mo} = 160.077cm^3\end{aligned}$$

maka untuk mencari ρ alloy Mo-W :

$$\rho = \frac{m_{total}}{V_{total}} = \frac{1656.14g}{160.077cm^3} = 10.34 \frac{g}{cm^3}$$

B. Rhenium – Tungsten alloy sebagai daerah fokus target

Persentase bobot untuk tungsten (W) adalah 90 % sedangkan persentase bobot untuk Rhenium (Re) adalah 10 %.

$$\text{Diketahui : } \rho_{Re} = 21.02 \text{ g/cm}^3 \qquad \% \text{ Re} = 10 \%$$

$$\rho_W = 19.3 \text{ g/cm}^3 \qquad \% \text{ W} = 90 \%$$

$$\text{BM Re} = 75 \text{ g/mol} \qquad \text{BM W} = 74 \text{ g/mol}$$

Diasumsikan persentase bobot total menyatakan massa total Re – W alloy sehingga massa Re adalah 10 g, sedangkan massa W adalah 90 g.

(lanjutan)

$$\text{mol Re} = 10\text{g} \cdot \frac{\text{mol}}{75\text{g}} = 0.133 \text{ mol}$$

$$\text{mol W} = 90\text{g} \cdot \frac{\text{mol}}{74\text{g}} = 1.216 \text{ mol}$$

$$\text{Re} : \text{W} = 0.133 : 1.216 = 1 : 9.122$$

$$\begin{aligned} \text{BM alloy} &= n_{\text{W}} \cdot \text{Ar}_{\text{W}} + n_{\text{Re}} \cdot \text{Ar}_{\text{Re}} \\ &= 9 \cdot \left(74 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) + 1 \cdot \left(75 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \\ &= 750.028 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \end{aligned}$$

Diasumsikan bahwa mol yang terkandung dalam *alloy* sebesar 1 mol, sehingga

Massa total *alloy* dengan 1 mol adalah 750.028 g.

Sesuai dengan hukum kekekalan massa :

$$\begin{aligned} m_{\text{total}} &= m_{\text{W}} + m_{\text{Re}} && ; \text{Re} : \text{W} = 1 : 9.122 \\ &= 9.122x + x && ; \frac{m_{\text{Re}}}{m_{\text{W}}} = \frac{1}{9.122} \\ 750.028 &= 10.122x && ; m_{\text{W}} = 9.122 m_{\text{Re}} \\ x &= 74.098\text{g} && ; m_{\text{Re}} = x \end{aligned}$$

Maka dapat ditentukan volume tiap unsur dalam *alloy* dengan perhitungan sebagai berikut

(lanjutan)

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

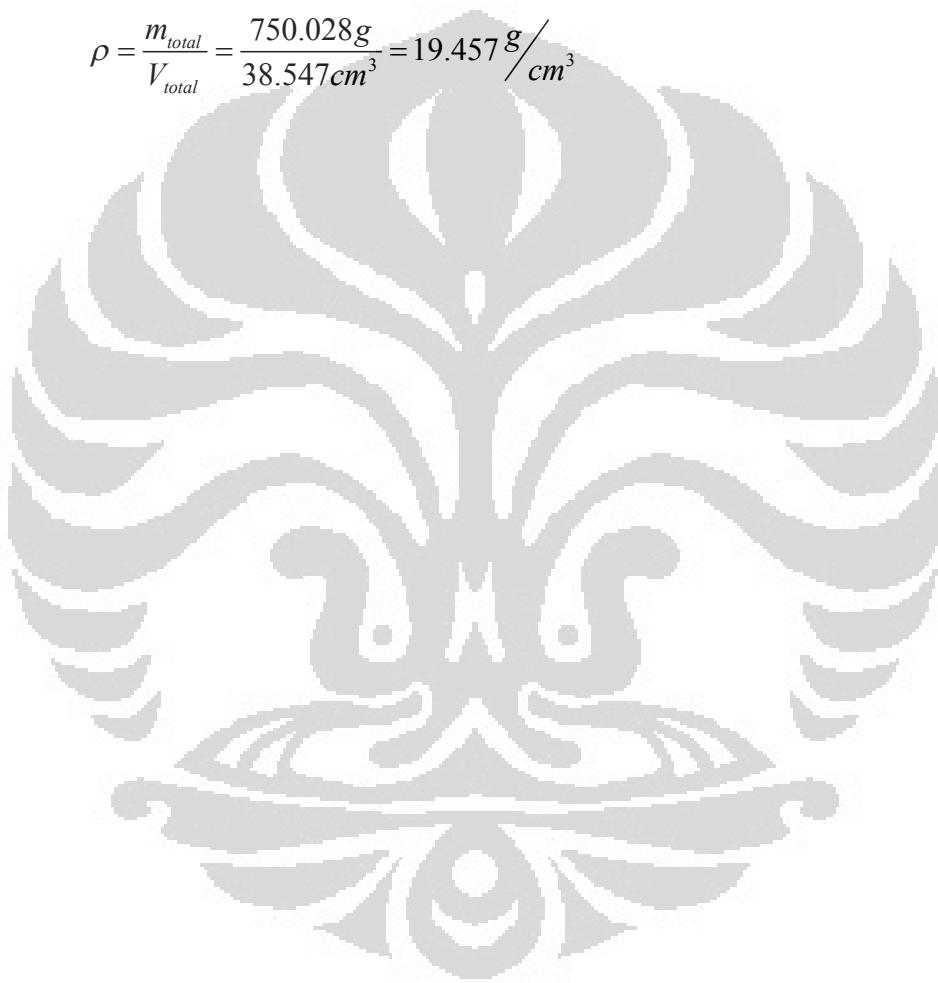
$$V_W = \frac{m_W}{\rho_W} = \frac{675.929}{19.3} = 35.022 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Re}} = \frac{m_{\text{Re}}}{\rho_{\text{Re}}} = \frac{74.098}{21.02} = 3.525 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{total}} = V_W + V_{\text{Re}} = 38.517 \text{ cm}^3$$

maka untuk mencari ρ alloy Re-W :

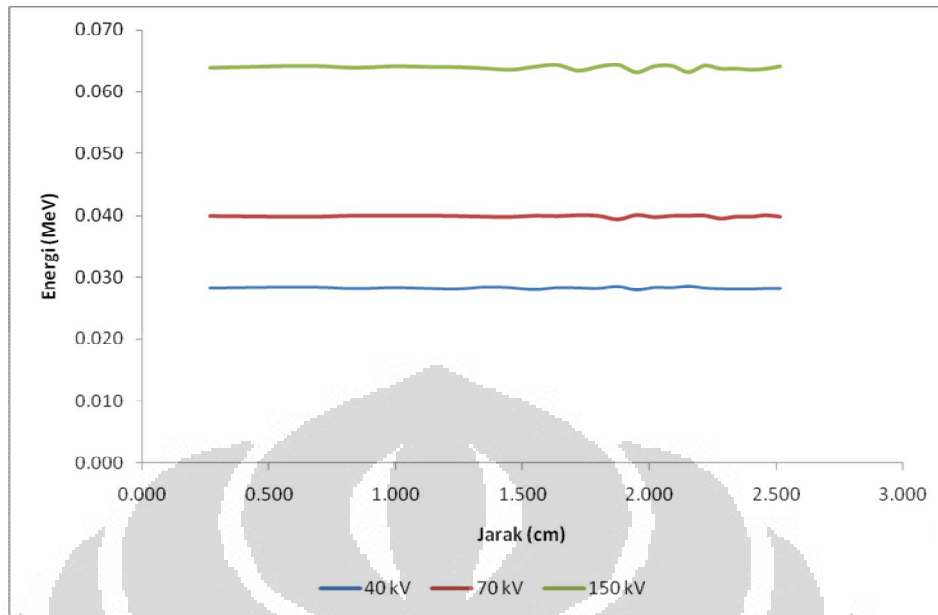
$$\rho = \frac{m_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} = \frac{750.028 \text{ g}}{38.547 \text{ cm}^3} = 19.457 \text{ g/cm}^3$$



Lampiran III :Data pengolahan *Mean Energy* simulasi monte carlo modul kedua

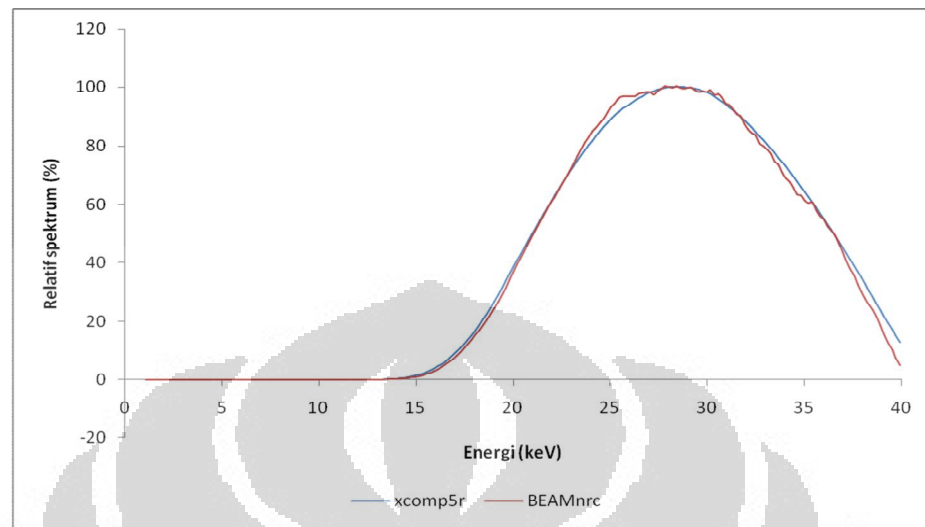
40 kV		70 kV		150 kV	
jarak (cm)	Energi (MeV)	jarak (cm)	Energi (MeV)	jarak (cm)	Energi (MeV)
0.265	0.028	0.265	0.040	0.265	0.064
0.640	0.028	0.640	0.040	0.640	0.064
0.834	0.028	0.834	0.040	0.834	0.064
0.990	0.028	0.990	0.040	0.990	0.064
1.123	0.028	1.123	0.040	1.123	0.064
1.242	0.028	1.242	0.040	1.242	0.064
1.351	0.028	1.351	0.040	1.351	0.064
1.452	0.028	1.452	0.040	1.452	0.063
1.546	0.028	1.546	0.040	1.546	0.064
1.634	0.028	1.634	0.040	1.634	0.064
1.718	0.028	1.718	0.040	1.718	0.063
1.798	0.028	1.798	0.040	1.798	0.064
1.875	0.028	1.875	0.039	1.875	0.064
1.948	0.028	1.948	0.040	1.948	0.063
2.019	0.028	2.019	0.040	2.019	0.064
2.088	0.028	2.088	0.040	2.088	0.064
2.154	0.029	2.154	0.040	2.154	0.063
2.218	0.028	2.218	0.040	2.218	0.064
2.281	0.028	2.281	0.040	2.281	0.064
2.342	0.028	2.342	0.040	2.342	0.064
2.401	0.028	2.401	0.040	2.401	0.063
2.459	0.028	2.459	0.040	2.459	0.064
2.515	0.028	2.515	0.040	2.515	0.064
Mean=	0.028	Mean=	0.040	Mean=	0.064

(lanjutan)

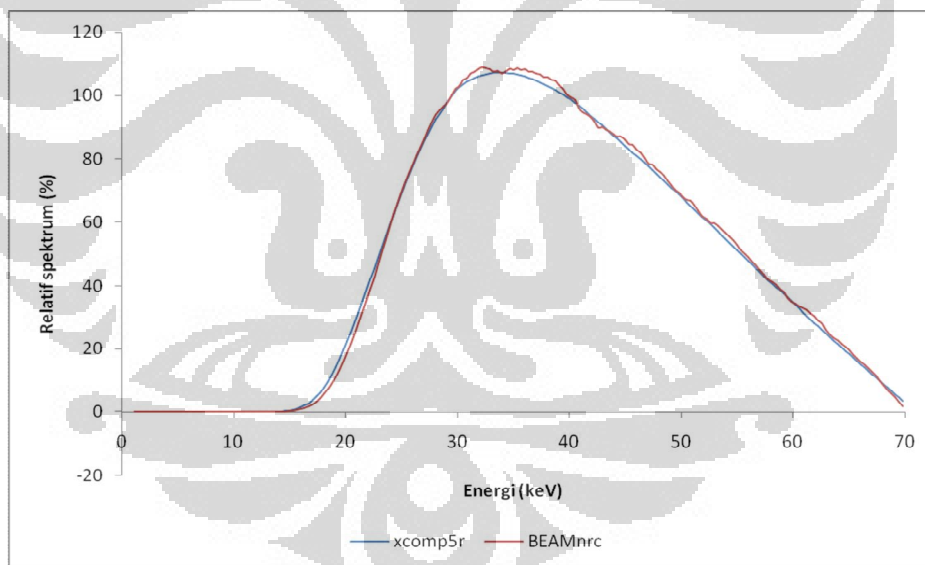


Gambar Distribusi energi *fluence* foton terhadap jarak untuk yang menunjukkan besar mean energi untuk tiap tegangan tabung yang digunakan

Lampiran IV : Kurva Distribusi Spektrum sinar-X dalam melakukan perhitungan FWHM dalam satuan energi keV

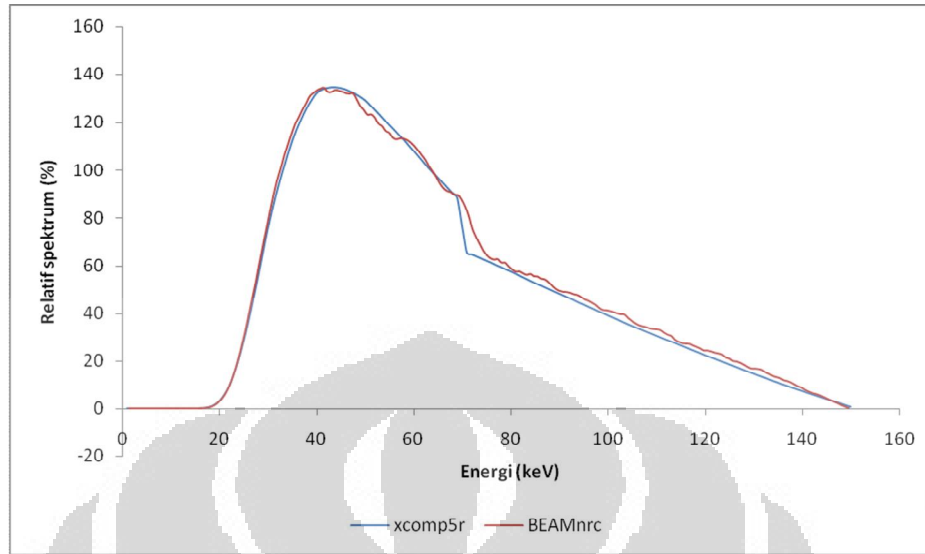


(a)



(b)

(lanjutan)



(c)

Tabel hasil perhitungan lebar FWHM spektrum sinar-X dalam satuan energi keV

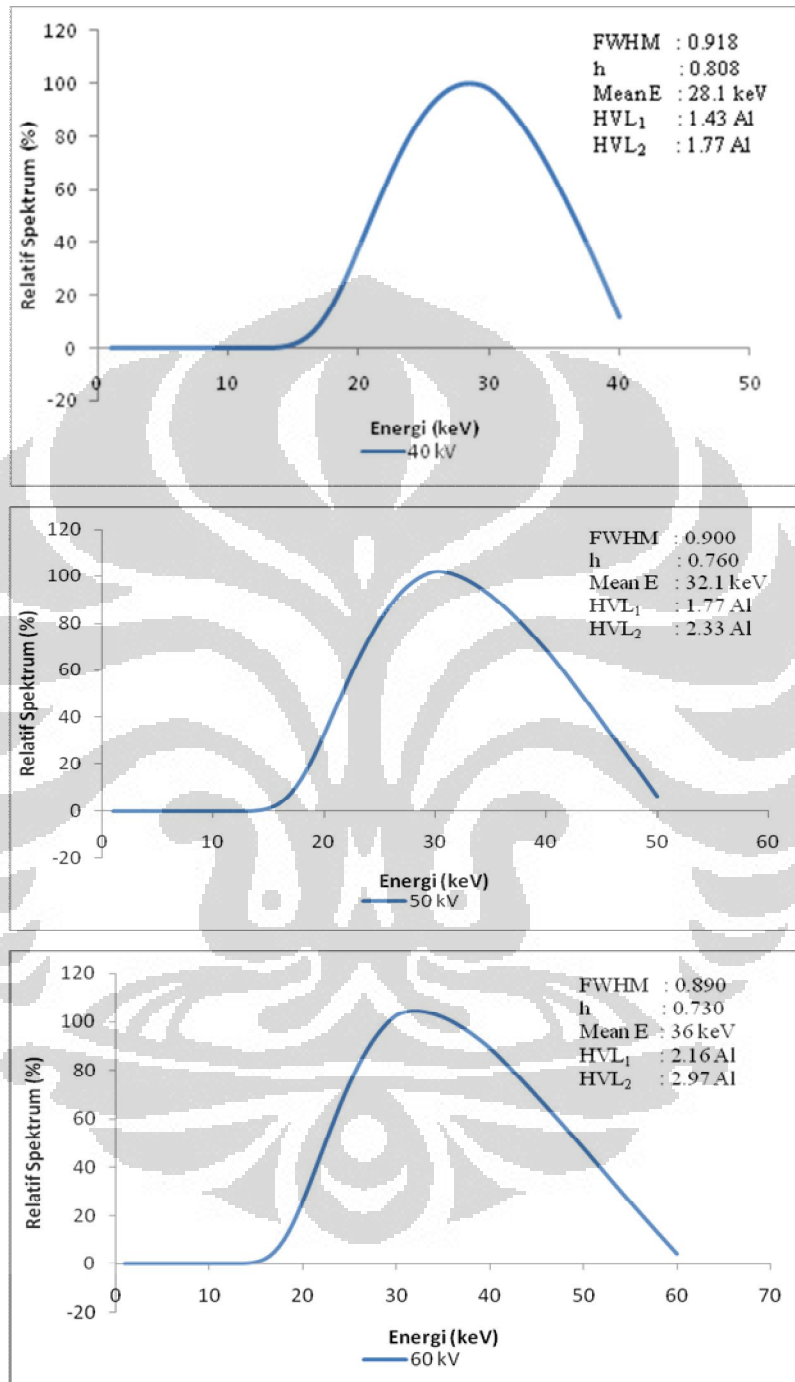
Simulasi Monte Carlo

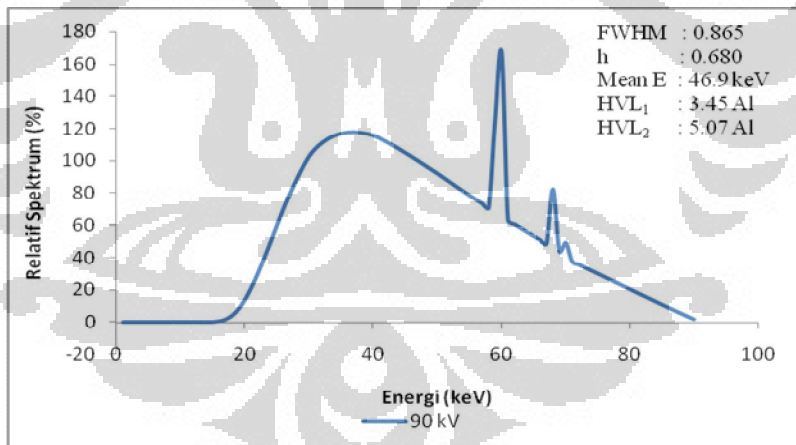
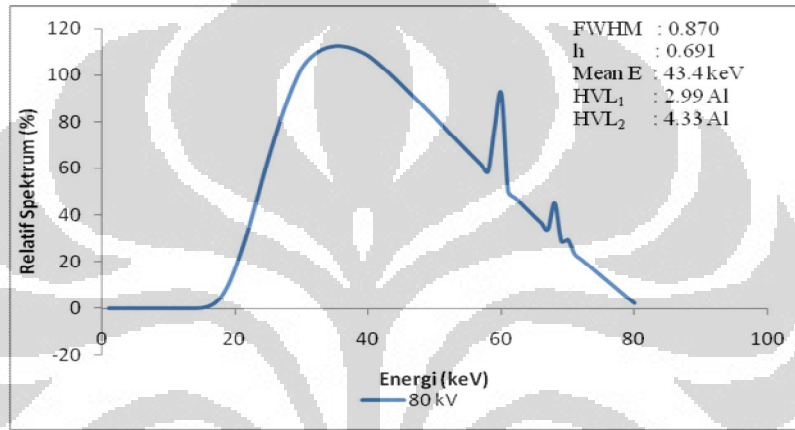
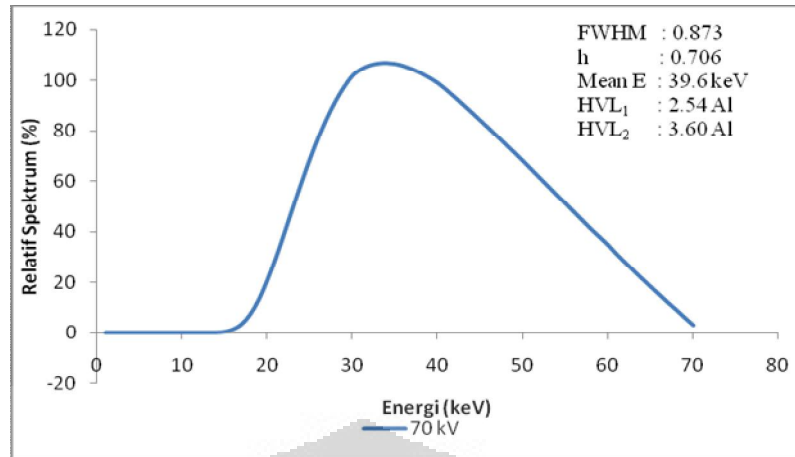
Kualitas Radiasi	Tegangan tabung (kV)	Energi batas kiri (keV)	Energi batas kanan (keV)	FWHM (keV)
RQR 2	40	21.09	36.48	15.39
RQR 5	70	23.58	54.57	30.99
RQR 10	150	31.84	72.38	40.54

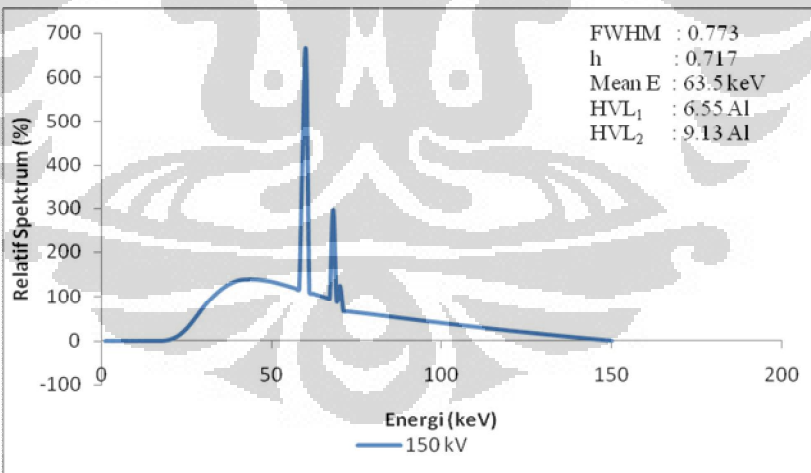
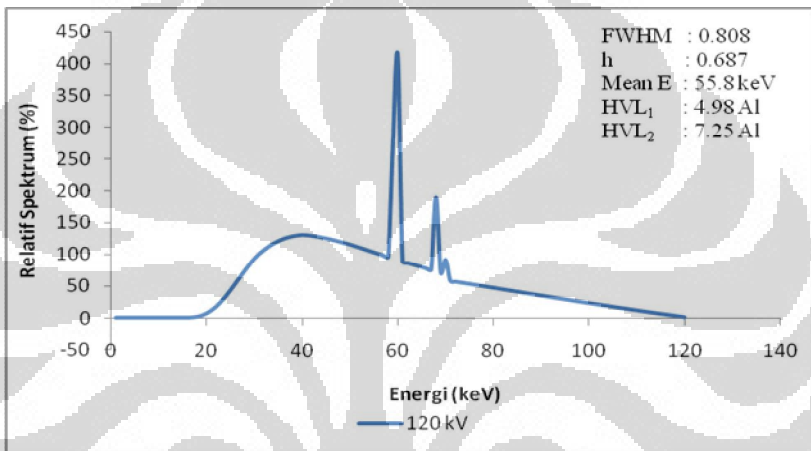
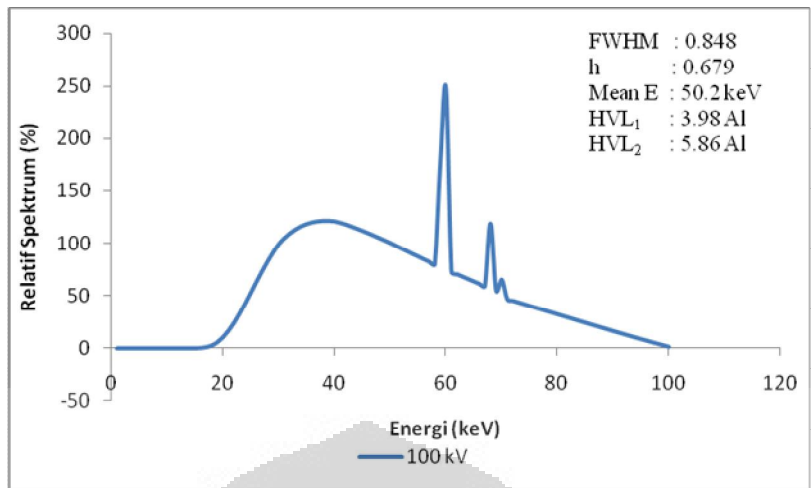
Program xcomp5r

Kualitas Radiasi	Tegangan tabung (kV)	Energi batas kiri (keV)	Energi batas kanan (keV)	FWHM (keV)
RQR 2	40	21.01	36.51	15.50
RQR 5	70	23.40	54.25	30.85
RQR 10	150	29.19	70.83	41.63

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







(lanjutan)

Spektrum sinar-X pada setiap tegangan tabung didapat menggunakan xcomp5r dengan pengaturan yang serupa dengan simulasi monte carlo BEAMnrc yang telah dilakukan. Parameter kualitas radiasi, seperti FWHM, homogenitas serta mean energy berdasarkan program xcomp5r digunakan sebagai data pembanding untuk simulasi monte carlo.



Lampiran VI : Tabel Perbandingan Homogenitas xcomp5r terhadap Homogenitas berdasarkan IAEA TRS No. 457

Tegangan tabung (kV)	FWHM xcomp5r	Homogenitas xcomp5r	Homogenitas TRS No. 457
40	0.918	0.808	0.81
50	0.900	0.760	0.76
60	0.890	0.727	0.74
70	0.873	0.706	0.71
80	0.870	0.691	0.69
90	0.865	0.680	0.68
100	0.848	0.679	0.68
120	0.808	0.687	0.68
150	0.773	0.717	0.72

Berdasarkan plot data FWHM xcomp5r terhadap homogenitas yang merupakan rasio antara HVL_1 dan HVL_2 , maka didapatkan hubungan FWHM terhadap homogenitas seperti pada persamaan

$$y = 17.39x^2 - 28.82x + 12.61$$

x = besar FWHM untuk tiap tegangan tabung

y = koefisien homogenitas spektrum

Lampiran VII : Tabel Koefisien Homogenitas Spektrum simulasi monte carlo dan perbandingan terhadap data xcomp5r maupun TRS No. 457

Tegangan tabung (kV)	FWHM Gaussian		Homogenitas			Ketidakpastian (%)	
	xcomp5r	monte carlo	xcomp5r	monte carlo	TRS 457	xcomp5r*	TRS 457**
40	0.918	0.916	0.808	0.803	0.81	0.647	0.903
70	0.873	0.868	0.706	0.696	0.71	1.355	1.972
150	0.773	0.773	0.717	0.723	0.72	0.731	0.369

Keterangan : *) ketidakpastian koefisien homogenitas simulasi monte carlo terhadap program xcomp5r
 **) ketidakpastian koefisien homogenitas simulasi monte carlo terhadap TRS No. 457

Perhitungan ketidakpastian monte carlo dilakukan terhadap literatur. Data hasil program xcomp5r dan data referensi TRS No. 457 dianggap sebagai literatur dalam penelitian ini. Sesuai dengan persamaan

$$\text{Penyimpangan Relatif} = \frac{|h_{lit} - h_{mc}|}{h_{lit}} \times 100\%$$

h_{mc} = homogenitas berdasarkan simulasi monte carlo

h_{lit} = homogenitas literature berdasarkan xcomp5r dan monte carlo