

**RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI
RENDAH**

SKRIPSI

Oleh:
FIRLI NADIA ADHISTI
115090307111002



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2016

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD $\text{CaSO}_4\cdot\text{Dy}$
BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI
RENDAH**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Oleh:
FIRLI NADIA ADHISTI
115090307111002



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2016

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI
RENDAH**

Oleh :

Firli Nadia Adhisti
115090307111002

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Pembimbing I



Chomsin S. W., S.Si, M.Si, Ph.D
NIP. 19691020 199512 1 002

Pembimbing II



Dra. C. Tuti B., M.Si.
NIP. 19601127 198603 2 004

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Brawijaya



Chair Maryanto, Ph.D.
NIP. 19710621 199802 1 001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Firli Nadia Adhisti
NIM : 115090307111002
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi Berjudul :

RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI RENDAH

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 16 Agustus 2016
Yang menyatakan,



(Firli Nadia Adhisti)
NIM. 115090307111002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD CaSO₄:Dy BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI RENDAH

ABSTRAK

Setiap pekerja pada perusahaan atau instansi yang memanfaatkan radiasi sinar X sangat beresiko terpapar radiasi selama melaksanakan tugasnya, sehingga diperlukan alat pemantauan dosis radiasi. Dosimeter TLD yang akan digunakan harus terkalibrasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kurva kalibrasi dari sumber radiasi sinar X energi rendah, dan mengetahui ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter perorangan TLD CaSO₄:Dy buatan BARC. Metode yang digunakan adalah metode kalibrasi dosimeter TLD CaSO₄:Dy dengan menggunakan kurva kalibrasi yang merupakan hasil respon dari TLD CaSO₄:Dy yang disinari dengan sumber radiasi sinar X energi rendah sesuai ISO 4037-4. Penyinaran TLD CaSO₄:Dy dengan variasi dosis yaitu 0,1; 0,3; 0,5; 1; 1,5; dan 3 mSv. Penelitian ini menghasilkan kemiringan garis dari kurva kalibrasi yang berbeda-beda bergantung energi yang dipancarkan dari sinar X energi rendah dengan gradient sebesar 0,0046 hingga 0,0146. Ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter perorangan TLD CaSO₄:Dy buatan BARC dengan tingkat kepercayaan 95% adalah berkisar antara 14%-22%. Kurva kalibrasi yang diperoleh dalam penelitian ini dapat digunakan untuk proses evaluasi dosis terhadap radiasi sinar X energi rendah.

**Kata Kunci : Sinar X Energi Rendah, ISO 4037-4, Kurva Kalibrasi,
Dosimeter Perorangan, TLD BARC.**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



PERSONAL DOSEMETER RESPONSE TLD CaSO₄:Dy MADE BY BARC TOWARD LOW ENERGY X-RAY RADIATION

ABSTRACT

Every worker at company or institution which use X-ray radiation has highly risk to be exposed by radiation while doing their work. Therefore radiation dose instrument is needed. TLD dosimeter that will be used must be calibrated. The aim for this research is to determine calibration curve from low energy X-ray radiation source and to know uncertainty of calibration curve from personal dosimeter TLD CaSO₄:Dy made by BARC. The method used is dosimeter calibration TLD CaSO₄:Dy using calibration curve which is the response result from TLD CaSO₄:Dy irradiated by low energy X-ray radiation source according to ISO 4037-4. The dose of TLD CaSO₄:Dy radiation used vary from 0,1; 0,3; 0,5; 1; 1,5; and 3 mSv. This research results in different slope from calibration curve which depend on radiation energy from low energy X-rays with gradient of 0.0046 to 0.0146. The uncertainty of calibration curve from personal dosimeter TLD CaSO₄:Dy made by BARC with confident level 95% is about 14% to 22%. Calibration curve obtained in this research can be used for dose evaluation process to low energy X-ray radiation.

Keywords: Low Energy X-Ray, ISO 4037-4, Calibration curve, Personal Dosimeter, TLD BARC.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi dengan judul “RESPON DOSIMETER PERORANGAN TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ BUATAN BARC TERHADAP RADIASI SINAR X ENERGI RENDAH” ini dengan baik. Sholawat dan salam tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan dan mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya.

Dalam pelaksanaan pengambilan data maupun penulisan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dorongan semangat dan iringan doa dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

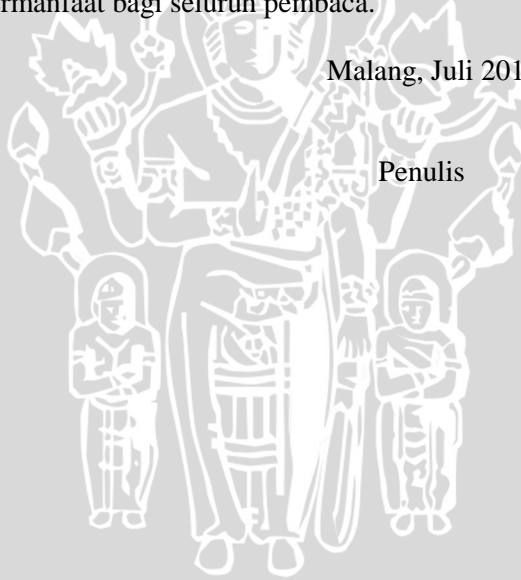
1. Kedua orang tua penulis, Ayahanda Kardino dan Ibunda Siti Fatimah, kakak, adik, saudara serta keluarga besar yang selalu memberikan dukungan semangat, dan doa yang sangat membantu untuk penulis.
2. Bapak Sukir Maryanto, PhD, selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.
3. Bapak Chomsin S. Widodo S.Si. M.Si. Ph.D. selaku Pembimbing I atas bimbingan yang telah diberikan kepada penulis.
4. Bapak Drs. Bunawas, APU. selaku Pembimbing II atas segala bantuan dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis.
5. Ibu Dra. C. Tuti B., M.Si. selaku Pembimbing Lapang atas bantuan, bimbingan dan pengajaran dalam melakukan pelaksanaan pengambilan data.
6. Bapak Rofiq Syaifudin atas bantuan serta bimbingan pengetahuan tambahan yang telah diberikan.
7. Bapak Agung atas bantuan yang diberikan kepada penulis.
8. Bapak Achmad Hidayat selaku Dosen Pembimbing Akademik.

9. Nurul Hidayah, Maharani Suci Rajapadni, Irene Lindawati dan Mochamad Adnan Kashougi selaku teman seperjuangan di PTKMR BATAN yang telah membantu, memberikan semangat, dorongan dan doa untuk penulis.
10. Sukma Wahyu Fitriani, Layli Amaliya, Nur Khasanah, dan teman-teman Fisika UB 2011 atas doa dan dorongan semangatnya untuk penulis.
11. Yeni, Pram, Weni, Ayu, Mas Helmi, Mbak Aisyah, Mbak Nia, Mbak Nova yang selaku memberikan bantuan, dukungan, wejangan, semangat dan doanya kepada penulis.

Akhir kata penulis memohon maaf sebesar-besarnya atas segala bentuk kekurangan dalam pelaksanaan maupun penulisan skripsi ini. Penulis sadar bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna, namun besar harapan dari penulis agar laporan ini dapat berguna dan dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Malang, Juli 2016

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi	5
2.2 Dosimetri Radiasi	6
2.2.1 Paparan Radiasi (<i>Exposure</i>)	6
2.2.2 Laju Paparan	6
2.2.3 Kerma	7
2.2.4 Dosis Serap (<i>Absorbed Dose</i>)	7
2.2.5 Dosis Ekuivalen	8
2.2.6 Dosis Efektif	9
2.2.7 Dosis Ekuivalen Perorangan Hp(d)	9
2.3 Dosimeter Perorangan	10
2.4 Dosimeter Termoluminesensi (TLD)	10
2.4.1 Mekanisme Kerja Termoluminesensi	10
2.4.2 Karakteristik Material TLD	12
2.5 TLD CaSO ₄ :Dy	13
2.5.1 TLD <i>Reader</i>	15
2.6 Sinar X	16
2.6.1 Proses Terjadi Sinar X	17

2.6.2 Interaksi Sinar X dengan Materi	18
2.6.3 Pesawat Sinar X	20
2.7 Kualitas Radiasi (<i>Radiation Quality</i>)	21
2.8 Fantom	21
2.9 Proteksi Radiasi	22
2.10 Nilai Batas Dosis (NBD)	23

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	25
3.2.1 Alat	25
3.2.2 Bahan	26
3.3 Tahap Penelitian	26
3.3.1 Persiapan	26
3.3.1.1 <i>Annealing</i>	26
3.3.1.2 Penyinaran Keseragaman TLD CaSO ₄ :Dy	27
3.3.1.3 Pengelompokan TLD CaSO ₄ :Dy	28
3.3.2 Pengecekan Kestabilan Sistem Intrumen Dosimeter.....	29
3.3.3 Pengukuran Kerma Standar Sumber Radiasi	31
3.3.4 Penyinaran Kalibrasi Pesawat Sinar X	34
3.3.5 Pengolahan Data	37
3.3.5.1 Penentuan Kerma Udara dan Dosis Ekivalen Perorangan Hp(10)	37
3.3.5.2 Penentuan Lama Waktu Penyinaran	38
3.3.5.3 Penentuan Nilai Variasi Keseragaman	38
3.3.5.4 Penentuan Respon TLD Sinar X Energi Rendah	40
3.3.5.5 Pembuatan Kurva Kalibrasi Sinar X Energi Rendah	40
3.3.5.6 Pembuatan Kurva Terompat Sinar X Energi Rendah	41
3.3.5.7 Penentuan Ketidakpastian Kalibrasi	42

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penyinaran Keseragaman TLD CaSO ₄ :Dy	45
4.2 Hasil Pengecekan Kestabilan Sistem Intrumen Dosimeter	46

4.3 Hasil Bacaan Tanggapan TLD CaSO_4 :Dy	48
4.4 Hasil Kerma Standar Sinar X Energi Rendah	50
4.5 Kurva Kalibrasi Sinar X Energi Rendah	51
4.6 Kurva Terompet Sinar X Energi Rendah	54
4.7 Ketidakpastian Kurva Kalibrasi	57

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61

DAFTAR PUSTAKA	63
-----------------------------	----

LAMPIRAN	67
-----------------------	----



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Daya tembus radiasi pengion	5
Gambar 2.2	Mekanisme kerja termoluminesensi	12
Gambar 2.3	TLD <i>card</i> dan <i>disk calsium sulfat</i> dengan aktivator <i>dysprosium</i> (CaSO ₄ :Dy)	14
Gambar 2.4	TLD <i>badge</i> dengan <i>holder</i>	14
Gambar 2.5	Skema kerja TLD <i>reader</i>	16
Gambar 2.6	Proses terjadinya sinar X Bremsstrahlung	17
Gambar 2.7	Proses terjadinya sinar X karakteristik	18
Gambar 2.8	Efek fotolistrik	19
Gambar 2.9	Efek hamburan Compton	19
Gambar 2.10	Produksi pasangan	20
Gambar 2.11	Fantom papan, Fantom tiang, dan Fantom batang	22
Gambar 3.1	Proses <i>annealing</i> dengan menggunakan oven sebelum penyinaran.....	27
Gambar 3.2	Penyinaran keseragaman TLD CaSO ₄ :Dy dengan menggunakan sumber radiasi standar ¹³⁷ Cs.....	28
Gambar 3.3	Penyusunan TLD pada fantom	28
Gambar 3.4	Detektor <i>Ionization Chamber</i> 600cc yang dipapari dengan sumber radiasi standar ⁹⁰ Sr dalam proses pengecekan kestabilan	30
Gambar 3.5	Pengukuran kerma standar pesawat sinar X	33
Gambar 3.6	Hygrometer, termometer dan barometer	33
Gambar 3.7	Mesin kontrol pesawat sinar X	34
Gambar 3.8	Penyinaran TLD pada fantom dengan sumber radiasi pesawat sinar X	35
Gambar 3.9	Penyusunan TLD CaSO ₄ :Dy saat akan dilakukan Penyinaran	35
Gambar 3.10	Diagram alir penelitian	36
Gambar 3.11	Peta kendali	39
Gambar 3.12	Kurva terompot standar IAEA	42
Gambar 4.1	Hasil uji keseragaman TLD	45
Gambar 4.2	Kurva kalibrasi sinar X energi rendah	52
Gambar 4.3	Kurva kalibrasi terhadap respon TLD.....	53
Gambar 4.4	Kurva terompot sinar X energi rendah pada	

	tegangan 15 kV	55
Gambar 4.5	Kurva terompet sinar X energi rendah pada tegangan 20 kV	56
Gambar 4.6	Kurva terompet sinar X energi rendah pada tegangan 25 kV	56

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Faktor bobot radiasi	8
Tabel 2.2 Faktor bobot jaringan/organ	9
Tabel 2.3 Beberapa jenis karakteristik dari material TLD	13
Tabel 2.4 Karakteristik dari TLD <i>disk</i>	15
Tabel 3.1 Karakteristik kualitas radiasi sinar X energi rendah	32
Tabel 3.2 Faktor kalibrasi detektor <i>Ionization Chamber</i> 600cc	37
Tabel 3.3 Faktor konversi	38
Tabel 4.1 Hasil pengecekan kestabilan sistem instrumen Dosimeter	47
Tabel 4.2 Hasil bacaan tanggapan respon TLD CaSO ₄ :Dy pesawat sinar X	49
Tabel 4.3 Data kerma udara dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10)	50
Tabel 4.4 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 15 kV	58
Tabel 4.5 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 15 kV	58
Tabel 4.6 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 15 kV	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Gambar alat dan bahan penelitian	67
Lampiran 2. Pengukuran kerma udara pesawat sinar X	71
Lampiran 3. Perhitungan $H_p(10)$ dan K_u	74
Lampiran 4. Perhitungan waktu penyinaran	76
Lampiran 5. Data pembacaan TLD	78
Lampiran 6. Perhitungan ketidakpastian kurva kalibrasi	81
Lampiran 7. Perhitungan kurva terompet	86
Lampiran 8. Peta kontrol penyinaran keseragaman	89



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada setiap pekerja yang ada di perusahaan maupun instansi yang memanfaatkan radiasi sinar X tidak terlepas dari resiko terpapar radiasi sinar X selama melakukan pekerjaan tersebut. Menurut Peraturan Pemerintah No. 63 Tahun 2000 tentang Keselamatan Radiasi, yang menjelaskan bahwa pengusaha instalasi harus mewajibkan setiap pekerja untuk memakai peralatan pemantauan dosis perorangan, sesuai dengan jenis instalasi dan sumber radiasi yang digunakan (PP, 2000). BAPETEN selaku badan pengawas penggunaan radiasi juga mengeluarkan PERKA BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Dosis (NBD) yang diterima oleh pekerja dan masyarakat umum (BAPETEN, 2013). Adanya ketentuan tersebut membuat perusahaan maupun instansi berupaya menggunakan sumber radiasi sinar X yang memiliki paparan rendah agar dapat meminimalisir dosis yang berdampak pada pekerja sebagai potensi bahaya radiasi. Sumber radiasi yang banyak digunakan adalah radiasi sinar X energi rendah. Sesuai ISO 4037-4, radiasi sinar X energi rendah memiliki rentang energi dari 10 kV hingga 30 kV (ISO, 2004).

Dosimeter perorangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah dosimeter termoluminesensi (TLD) dengan material penyusun *calcium sulfat* (CaSO_4) dan aktivator *dysprosium* (Dy), buatan BARC India. Dosimeter termoluminesensi ini merupakan jenis dosimeter yang banyak digunakan sebagai alat pemantauan radiasi di Indonesia. Ada beberapa jenis dosimeter termoluminesensi lain dengan material penyusun dan aktivator berbeda yaitu dosimeter TLD LiF dengan aktivator Mg, Ti, Cu dan P. Dosimeter ini memiliki tanggapan energi yang baik dengan kebergantungan energi yang relatif rendah, namun dosimeter ini memiliki harga yang mahal. Kelebihan dari dosimeter TLD CaSO_4 :Dy dibandingkan dengan dosimeter yang lain adalah dosimeter ini memiliki sensitivitas kepekaan 40 kali lebih tinggi dari dosimeter TLD lain, seperti TLD LiF:Mg,Ti, memiliki sistem pengoperasian yang mudah, dapat mengevaluasi dosis lebih cepat daripada dosimeter lainnya, mampu memantau radiasi dengan rentang dosis dari rendah hingga tinggi

yaitu hingga 1 mR, dapat dipakai ulang dan tidak peka terhadap faktor-faktor lingkungan (Syaifudin dkk., 2006). Serta harga dosimeter TLD ini tergolong lebih murah dari dosimeter TLD yang lainnya.

Suatu alat ukur radiasi harus dikalibrasi terlebih dahulu. Hal ini sesuai dengan PERKA BAPETEN No. 6 Tahun 2009 yang menjelaskan bahwa alat ukur radiasi (dosimeter) yang digunakan dalam pemantauan proteksi radiasi harus memiliki respon energi yang sesuai dengan energi yang digunakan, rentang pengukuran yang cukup dengan tingkat radiasi yang diukur, dan terkalibrasi (BAPETEN, 2009). Namun kondisi saat ini, dosimeter TLD dikalibrasi dengan sumber radiasi sinar-X energi tinggi seperti Cesium-137 (^{137}Cs) yang memiliki energi sebesar 661,64 keV.

Berdasarkan uraian diatas, maka perlu dilakukan penelitian tentang respon dosimeter perorangan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC terhadap radiasi sinar X energi rendah ini, agar dapat diperoleh respon dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC dan kurva kalibrasi yang digunakan sebagai acuan kalibrasi TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dengan radiasi sinar X energi rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat disusun rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Apakah respon dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC berdasarkan radiasi sinar X energi rendah dengan berkas sempit (*narrow beam*) bergantung pada energi?
2. Bagaimana bentuk kurva kalibrasi dari sinar X dari radiasi sinar X energi rendah?
3. Berapa ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter perorangan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC?

1.3 Batasan Masalah

Agar tugas akhir ini tidak melebar, maka perlu adanya pembatasan masalah. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dalam penelitian ini, dosimeter perorangan yang digunakan adalah dosimeter perorangan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC India.
2. Dalam penelitian ini, fantom yang digunakan yaitu fantom *solid water* PMMA ukuran $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ dengan massa jenis 1 kg/cm^3 .
3. Dalam penelitian ini, paparan radiasi yang diamati adalah paparan radiasi sinar X energi rendah berdasarkan ISO 4037-4.
4. Dalam penelitian ini, sumber radiasi sinar X yang digunakan adalah sumber radiasi pesawat sinar X dengan kualitas radiasi N-15, N-20 dan N-25.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari tugas akhir tentang tanggapan dosimeter perorangan BARC ini adalah untuk :

1. Menjelaskan kebergantungan energi terhadap respon dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC berdasarkan radiasi sinar X energi rendah dengan berkas sempit (*narrow beam*).
2. Menentukan kurva kalibrasi dari sumber radiasi sinar X energi rendah.
3. Mengetahui ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter perorangan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah diharapkan dapat dijadikan acuan sebagai metode evaluasi dosis yang lebih akurat dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ terhadap radiasi sinar X energi rendah yang dapat digunakan untuk masa yang akan datang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)

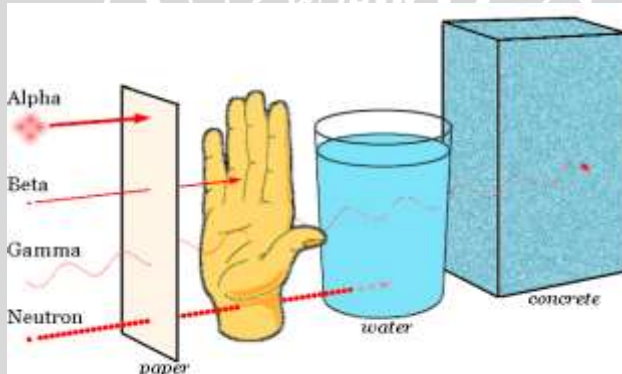


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi

Radiasi adalah pancaran energi melalui suatu materi atau ruang dalam bentuk panas, partikel atau gelombang elektromagnetik atau cahaya (foton) dari sumber radiasi (BATAN, 2008). Radiasi digolongkan menjadi dua jenis yaitu radiasi pengion dan radiasi non pengion.

Radiasi pengion atau radiasi nuklir adalah radiasi yang dapat menyebabkan proses ionisasi apabila berinteraksi dengan materi. Yang termasuk radiasi pengion adalah partikel alfa (α), partikel beta (β), sinar gamma (γ), sinar-X dan partikel neutron. Proses ionisasi dari radiasi pengion terhadap materi biologi yang mengenai secara langsung maupun tidak, dapat menyebabkan kerusakan mikroskopis pada jaringan, organ maupun sistem tubuh (BATAN,2008). Daya tembus radiasi pengion terhadap materi berbeda-beda satu dengan yang lainnya seperti pada Gambar 2.1 dibawah. Radiasi pengion yang memiliki daya tembus paling kecil yaitu partikel alfa yang tidak dapat menembus selembar kertas dan radiasi neutron yang memiliki daya tembus paling besar yaitu dapat menembus lapisan beton.



Gambar 2.1 Daya tembus radiasi pengion (BCM, 2007)

Radiasi non pengion adalah radiasi yang tidak dapat menyebabkan proses ionisasi apabila berinteraksi dengan materi. Yang termasuk radiasi non pengion adalah gelombang radio,

gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak, dan ultraviolet (BAPETEN, 2004). Beberapa jenis radiasi non pengion dapat menyebabkan terjadinya perubahan kimia atau panas pada materi yang dikenainya (Arief, 2012).

2.2 Dosimetri Radiasi

Dosimetri radiasi merupakan suatu ilmu yang mempelajari tentang besaran dan satuan dari radiasi (Hurst dan Turner, 1970). Besaran dan satuan dari radiasi tidak hanya mengenai dosis serap saja, tetapi banyak besaran dan satuan lain dari radiasi. Besaran dan satuan dari radiasi adalah sebagai berikut.

2.2.1 Paparan Radiasi (*Exposure*)

Paparan radiasi (X) adalah jumlah radiasi partikel bermuatan (sinar X atau Gamma) yang menimbulkan proses ionisasi di udara dalam volume tertentu.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.1)$$

Dimana dQ adalah jumlah muatan pasangan ion yang terbentuk dalam suatu elemen volume udara bermassa dm (Ahmed, 2007). Satuan SI dari paparan adalah Coulomb per kilogram (C/Kg) dan satuan lain yang sering digunakan adalah Roentgen (R). Konversi satuan Coulomb per kilogram (C/Kg) ke Roentgen (R) adalah sebagai berikut.

$$1 \text{ C/Kg} = 3881 \text{ R}$$
$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$$

2.2.2 Laju Paparan

Laju paparan (\dot{X}) adalah banyaknya jumlah paparan radiasi yang terjadi per satuan waktu. Laju paparan disebut juga dengan laju dosis. Satuan SI dari laju paparan adalah C/Kg per detik atau R/s. Satuan lain yang banyak digunakan adalah R/jam dengan turunan yaitu RmR/jam atau $\mu\text{R/jam}$ (Sunarya, 2014).

2.2.3 Kerma

Kerma (*Kinetic Energy Released in a Mass*) adalah jumlah energi kinetik partikel bermuatan yang dihasilkan akibat interaksi radiasi tak bermuatan dalam suatu material per satuan massa (Sunarya, 2014).

$$K = \frac{dE_{trans}}{dm} \quad (2.2)$$

Dimana dE_{trans} adalah jumlah energi kinetik mula-mula dari partikel bermuatan yang dilepaskan dalam bahan bermassa dm . Satuan SI dari kerma adalah gray (Gy) atau Joule per kilogram (J/Kg) (Ahmed, 2007).

2.2.4 Dosis Serap (*Absorbed Dose*)

Dosis serap adalah jumlah banyaknya energi yang diserap oleh bahan per satuan massa bahan.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.3)$$

Satuan SI dari dosis serap adalah Joule per kilogram (J/Kg) atau gray (Gy) (Justus dan Miller, 1999). Satuan lain dari dosis serap adalah erg/g atau rad (*radiation absorbed dose*). Konversi satuan dosis serap sebagai berikut.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g.}$$

$$1 \text{ gray (Gy)} = 100 \text{ rad}$$

Hubungan dosis serap dan paparan radiasi adalah sebagai berikut.

$$D = f \times X \quad (2.4)$$

Dimana D adalah dosis serap dengan satuan rad, f adalah faktor konversi dari laju paparan ke laju dosis serap dengan satuan rad/R dan X adalah paparan dengan satuan R (Sunarya, 2014).

2.2.5 Dosis Ekuivalen

Dosis ekuivalen (H) adalah hasil kali dari faktor bobot radiasi (WR) dengan dosis serap (D).

$$H = W_R \times D \quad (2.5)$$

Faktor bobot radiasi (W_R) diambil berdasarkan perbedaan sensitivitas jaringan atau organ terhadap jenis radiasi tertentu yang menyebabkan efek stokastik pada dosis jaringan atau organ yang rendah (ICRU, 1998). Nilai faktor bobot radiasi ditunjukkan pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Faktor bobot radiasi (ICRP, 1991).

Jenis Radiasi	Faktor Bobot Radiasi (W_R)
1. Foton, untuk semua energi	1
2. Elektron muon, semua energi	1
3. Neutron dengan energi	
a. <10 keV	5
b. 10 keV hingga 100keV	10
c. >100keV hingga 2 MeV	20
d. >2MeV hingga 20 MeV	10
e. >20 MeV	5
4. Proton, selain proton recoil, dengan energi > 2 MeV	5
5. Partikel alfa, fragmen fisi, inti berat	20

Apabila jenis radiasi berbeda namun dosis yang diserap sama, maka akan menimbulkan efek biologi yang berbeda pula. Hal ini karena daya ionisasi dari masing-masing jenis radiasi pun berbeda. Apabila semakin besar daya ionisasi, maka semakin tinggi pula tingkat kerusakan atau efek biologi yang ditimbulkan (Sunarya, 2014). Satuan SI dari dosis ekuivalen adalah Sievert (Sv). Satuan lain dari dosis ekuivalen adalah rem.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg}$$

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

2.2.6 Dosis Efektif

Dosis efektif (E) adalah jumlah hasil kali dosis ekivalen (H) dari seluruh organ tubuh dengan faktor bobot jaringan/organ (W_T).

$$E = \sum H \times W_T \quad (2.6)$$

Faktor bobot jaringan/organ (W_T) mewakili kontribusi relatif organ terhadap kerusakan total akibat efek stokastik untuk seluruh tubuh. Nilai faktor bobot organ ditunjukkan pada Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Faktor bobot jaringan/organ (ICRP, 1991).

Organ	Faktor bobot Organ (W_T)
Gonad	0,20
Dada	0,15
Sumsum tulang merah	0,12
Paru-paru	0,12
Lambung	0,12
Kelenjar gondok	0,05
Ginjal	0,05
Payudara	0,05
Kulit	0,01
Tulang (permukaan)	0,01
Organ/jaringan tubuh lainnya	0,05

2.2.7 Dosis Ekivalen Perorangan $H_p(d)$

Dosis ekivalen perorangan $H_p(d)$ adalah dosis ekivalen suatu titik jaringan lunak di kedalaman d (model bola ICRU) sesuai dengan daya tembusnya. Untuk radiasi dengan daya tembus lemah, biasanya diambil kedalaman d 0,07 mm untuk kulit dan kedalaman d 3 mm untuk mata. Untuk radiasi dengan daya tembus tinggi, biasanya diambil kedalaman d 10 mm untuk seluruh tubuh, sehingga $H_p(d)$ dapat ditulis sebagai $H_p(10)$ (ICRU, 1998).

2.3 Dosimeter Perorangan

Dosimeter perorangan adalah alat pencatat dosis radiasi yang diterima oleh setiap pekerja radiasi secara akumulatif dalam selang waktu tertentu. Jenis dosimeter perorangan yang hingga kini dikembangkan adalah dosimeter *film badge*, dosimeter termoluminesensi (TLD) dan dosimeter saku (*Pocket Dosemeter*) (Alatas, dkk., 2000).

2.4 Dosimeter Termoluminesensi (TLD)

Dosimeter termoluminesensi adalah dosimeter perorangan yang berupa material kristal yang terbentuk dari peristiwa luminesensi dengan bantuan panas sampai menghasilkan emisi berupa cahaya (Khain, 2003).

Luminesensi adalah peristiwa yang terjadi karena adanya elektron-elektron yang dapat menyerap energi radiasi dan berpindah ke orbit yang lebih tinggi, sehingga bahan material berada dalam keadaan tereksitasi. Terdapat dua peristiwa dalam proses luminesensi yaitu proses flourosensi dan fosforesensi. Flourosensi merupakan pancaran cahaya spontan, dimana pancarannya akan berhenti jika proses eksitasi pada bahan berhenti. Sedangkan fosforesensi merupakan pancaran cahaya yang berhenti sesaat setelah proses eksitasi pada bahan berhenti (McKinlay, 1981).

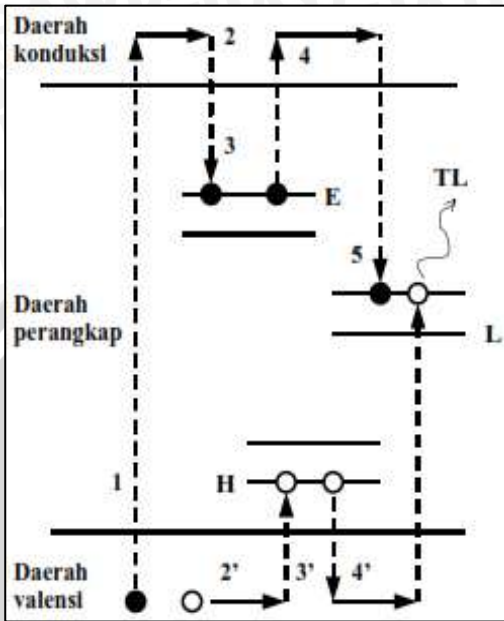
TLD memiliki keuntungan dan kekurangan. Keuntungan TLD antara lain yaitu mudah dalam pengoperasian, dapat digunakan untuk memantau dosis dari rentang dosis rendah hingga dosis tinggi, dapat dipakai berulang kali, dan tidak peka terhadap faktor lingkungan. Sedangkan kekurangan TLD antara lain yaitu data dosis yang tersimpan pada dosimeter akan hilang setelah proses pembacaan sehingga tidak bisa dilakukan pembacaan ulang (Justus dan Miller, 1999).

2.4.1 Mekanisme Kerja Termoluminesensi

Bahan termoluminesensi merupakan bahan isolator yang memiliki tiga model daerah pita energi yaitu daerah konduksi, daerah penangkap dan daerah valensi. Ketika bahan termoluminesensi menyerap energi radiasi pengion dan menembus bahan tersebut, maka akan dihasilkan pasangan elektron bebas melalui tiga proses

yaitu proses efek fotolistrik, efek hamburan Compton dan produksi pasangan. Efek fotolistrik adalah peristiwa terlepasnya elektron dari orbitnya ketika atom menyerap seluruh energi foton yang mengenainya akibat disinari cahaya atau gelombang elektromagnetik. Efek hamburan Compton adalah peristiwa terjadinya tumbukan antara foton dan elektron dalam suatu atom yang mengakibatkan sebagian energi foton menjadi energi gerak elektron dan sebagian energi hamburan foton. Produksi pasangan adalah proses terbentuknya pasangan elektron dan positron ketika energi foton diserap seluruhnya oleh pengaruh medan inti atom.

Mekanisme kerja termoluminesensi adalah ketika elektron bebas pada daerah valensi tereksitasi karena mendapatkan energi lebih dari radiasi pengion, maka elektron bebas tersebut akan meloncat ke pita konduksi. Dalam daerah konduksi, elektron akan bergerak bebas dan terjebak dalam perangkap elektron pada daerah perangkap. Elektron bebas tersebut dihasilkan dari proses ionisasi yang disebabkan dari pancaran radiasi pengion yang mengenai materi, sehingga proses ionisasi yang terjadi sebanding dengan jumlah total paparan radiasi yang mengenai materi. Hal ini mengakibatkan jumlah elektron yang terperangkap juga sebanding dengan jumlah ionisasi yang terjadi. Loncatan dari elektron bebas ke daerah konduksi akan menyebabkan bertambahnya jumlah lubang elektron bebas (*Hole*) pada daerah valensi. Elektron yang bergerak bebas mengakibatkan lubang-lubang elektron bebas (*Hole*) terperangkap dalam perangkap lubang pusat. Ketika energi panas diberikan pada bahan fosfor atau bahan termoluminesensi, maka elektron dan lubang bebas yang terperangkap akan terlepas dan terkombinasi menuju pusat luminesensi yang kemudian membentuk pasangan kembali dan memancarkan cahaya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Svaha, 2010).



Keterangan

- E : Perangkap elektron
- H : Perangkap Pusat
- L : Luminesensi
- : Elektron
- : Hole
- TL : Cahaya Luminesensi

Gambar 2.2 Mekanisme kerja termoluminesensi (Wibowo, 2008).

2.4.2 Karakteristik Material TLD

Bahan yang dapat menghasilkan fenomena termoluminesensi adalah bahan yang memiliki kemampuan untuk menangkap dan menyimpan energi radiasi pengion yang mengenainya dan dapat menghasilkan pancaran cahaya dengan nilai intensitas yang sebanding dengan besar energi radiasi yang diserap jika bahan diberikan rangsangan panas sesuai dengan karakteristiknya. Bahan yang memiliki sifat termoluminesensi antara lain adalah *litium flourida* (LiF), *litium borat* (Li₂B₄O₇), *berillium oksida* (BeO), *magnesium borat* (MgB₄O₇), *magnesium orthosilikat* (Mg₂SiO₄), *calcium sulfat* (CaSO₄), *calcium flourida* (CaF₂), dan *aluminium oksida* (Al₂O₃) (Kusumawati, dkk., 2004). Berikut adalah beberapa jenis karakteristik dari material TLD yang dapat ditunjukkan pada Tabel 2.3 sebagai berikut.

Tabel 2.3 Beberapa jenis karakteristik dari material TLD (Sofyan, 2012).

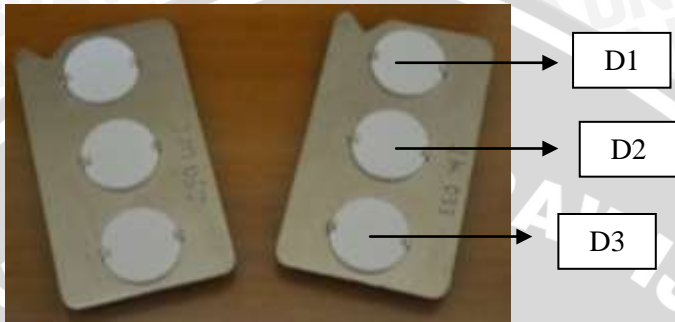
Tipe TLD	LiF	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	CaSO ₄ :Dy
Kerapatan (gm/mL) (Serbuk ~ ½ padat)	2,64	~2,4	2,61
Nomor atom efektif (Z) untuk penyerapan fotoelektrik	8,2	7,4	15,5
Spektrum emisi TL	3500-6000Å (4000 Å maks)	6300 Å (6050 Å maks)	4800 Å-5700 Å
Suhu puncak pancar TL	195°C	200°C	220°C
Efisiensi ⁶⁰ Co relatif terhadap LiF	1,0	0,15	20
Tanggapan energi 30 keV atau ⁶⁰ Co	1,25	0,9	~12,5
Jangkauan Pemakaian	3×10 ⁵ R	50 mR-10 ⁶ R	100μR-10 ⁵ R
Pemudaran (<i>Fading</i>)	5% per tahun pada 200°C	<5% dalam 3 bulan	2% dalam 1 bulan 8% dalam 6 bulan

2.5 TLD CaSO₄:Dy

TLD CaSO₄:Dy adalah dosimeter perorangan yang terbuat dari unsur material penyusun *calcium sulfat* dengan aktivator *dysprosium* CaSO₄:Dy yang diproduksi oleh perusahaan BARC (*Bhabha Atomic Research Centre*) yang berada di Trombay, Mumbai. TLD CaSO₄:Dy sering disebut juga dengan TLD-900. TLD ini terdiri dari TLD *card/disk* dan TLD *badge* dengan *holder*.

TLD *card* memiliki tiga tiga cakram teflon dengan diameter 13,3 mm dan ketebalan 0,8 mm, serta dimensi dari *card* aluminium

yaitu 52,5 mm x 30,0 mm x 1,0 mm. TLD *card* memiliki tiga *disk* yaitu *disk* 1 (D1), *disk* 2 (D2) dan *disk* 3 (D3).



Gambar 2.3 TLD *card* dan *disk* *calcium sulfat* dengan aktivator *dysprosium* ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$)

TLD *badge* dengan *holder* memiliki 3 filter yang berada diantara disknya. *Disk* 1 (D1) berada di antara sepasang kombinasi filter Al dan Cu yang memiliki ketebalan 1,0 mm dan 1,0 mm. *Disk* 2 (D2) berada di antara sepasang filter plastik *polystyrene* yang memiliki ketebalan 1,6 mm (180 mg/cm^2). *Disk* 3 (D3) berada di antara *open window* (jendela terbuka) yang melingkar dan memiliki ketebalan 14,5 mm dan 13,5 mm (Pradhan, dkk., 2002).



(a) Bagian dalam



(b) Bagian luar

Gambar 2.4 TLD *badge* dengan *holder*

TLD *disk* memiliki beberapa karakteristik antara lain seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 sebagai berikut.

Tabel 2.4 Karakteristik dari TLD *disk* (Pradhan, dkk., 2002).

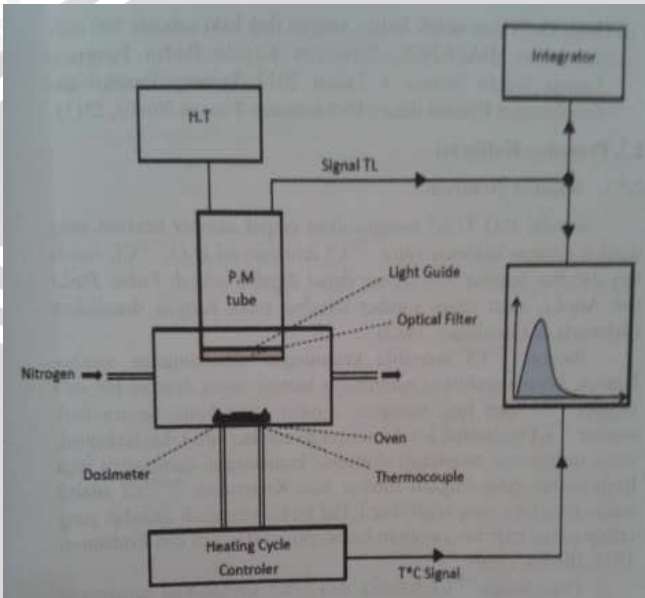
Rasio antara CaSO ₄ :Dy dan Teflon TLD	1 : 3
Nomor Atom Efektif (Z)	15,1
Densitas (Kepadatan) TLD <i>Disk</i>	2,52 g/cm ³
Titik Lunak Teflon	330 °C
Puncak Dasar Suhu Pijar	230 °C
Sensitivitas TLD <i>Disk</i>	Antara 30-40 kali lebih tinggi daripada LiF (TLD-100)
Pemudaran (<i>Fading</i>)	2-3% dalam 6 bulan
Efek Lingkungan	Diabaikan
Efek Cahaya	Diabaikan
Kisaran dosis linear yang digunakan	0,10 mSv sampai 20 Sv
Penggunaan Kembali	20 kali siklus

2.5.1 TLD *Reader*

TLD *reader* merupakan alat yang digunakan untuk membaca akumulasi jumlah energi yang ada pada TLD. Pada penelitian ini, TLD *reader* yang digunakan adalah TLD *badge reader* TL 1010 Nucleonix.

Ketika TLD akan dibaca, maka TLD card yang ada di dalam *holder* harus dibuka terlebih dahulu. Kemudian TLD card dimasukkan dan disusun sejajar ke dalam sebuah batangan logam (*planchette/tray*) yang akan diletakkan ke dalam mesin TLD *reader*. TLD kemudian dipanaskan oleh *coil* pemanas yang akan bersentuhan dan berinteraksi dengan TLD dan *planchette/tray*. Termokopel juga digunakan untuk mengukur temperatur suhu dari sirkulasi panas yang ada dalam TLD *reader* dan gas nitrogen digunakan untuk mengurangi sinyal yang diproduksi oleh udara yang tidak murni. Pada proses termoluminesensi akan terjadi pancaran cahaya yang melewati filter optik dan cahaya akan masuk ke dalam PMT, kemudian akan diukur keluaran dari PMT tersebut. Keluaran dari

PMT akan memiliki nilai sebanding dengan jumlah foton yang dihasilkan atau sebanding dengan dosis serap saat diintegrasikan. Perangkat TLD *reader* kemudian dihubungkan dengan PC dan hasil bacaan akan terbaca dan disimpan dalam *hard disk* atau dapat dicetak (Dam dan Morenello, 2006). Skema kerja TLD *reader* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 dibawah.



Gambar 2.5 Skema kerja TLD *reader* (Saadati, 2015).

2.6 Sinar X

Sinar X merupakan radiasi pengion bentuk elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang lebih pendek daripada gelombang cahaya (Smallman dan Bishop, 2000). Sinar X dihasilkan dari interaksi antara elektron dan atom yang terjadi di dalam suatu mesin khusus (Cember, 2009). Sinar X dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu sinar X energi tinggi, sinar X energi medium, dan sinar X energi rendah. Sinar X energi tinggi adalah sinar X dengan energi sangat besar yaitu sekitar 80-1000 keV (1 MeV), dan biasanya diproduksi pada sumber radiasi *synchrotron*. Sinar X energi medium adalah sinar X dengan energi sekitar 60-200 keV. Sinar X energi

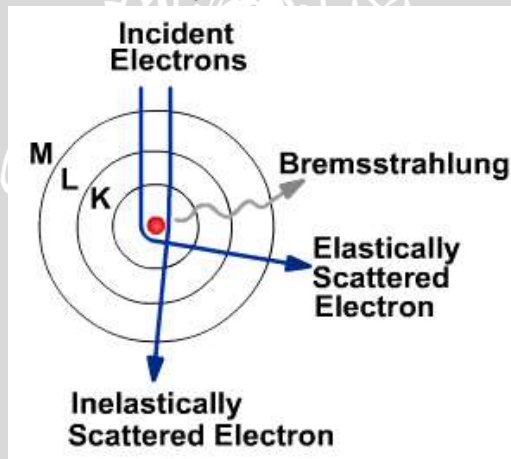
rendah adalah sinar X dengan energi sekitar 8-50 keV (NCRD, 1997).

2.6.1 Proses Terjadinya Sinar X

Berdasarkan proses terjadinya, sinar X dibagi menjadi 2 macam yaitu :

1. Sinar X Bremsstrahlung

Sinar X Bremsstrahlung merupakan sinar X yang terjadi karena adanya interaksi Coulomb yang terjadi antara elektron dengan inti suatu materi. Dalam interaksi ini, elektron mengalami perlambatan dan kehilangan sebagian energinya dalam bentuk foton bremsstrahlung atau sinar X bremsstrahlung (Gambar 2.6). Besar energi sinar X bremsstrahlung sama dengan energi kinetik saat terjadinya perlambatan (Halliday dan Resnick, 1999).

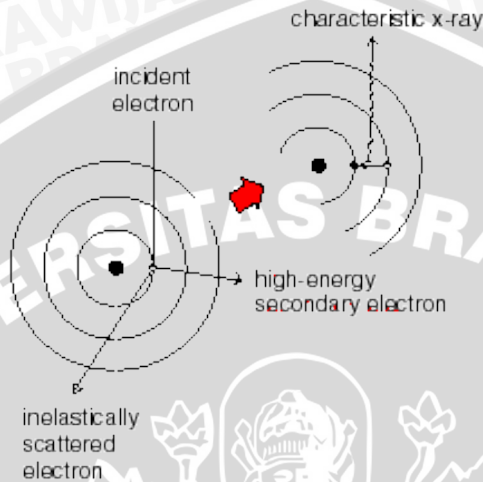


Gambar 2.6 Proses terjadinya sinar X Bremsstrahlung (<https://ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/xrays.htm>)

2. Sinar X Karakteristik

Sinar X karakteristik merupakan sinar X yang terjadi karena adanya interaksi Coulomb yang terjadi antara elektron dengan elektron pada orbit atom dari suatu materi. Dalam interaksi ini, elektron pada suatu orbit akan terpelempar keluar dari lintasannya dan diisi oleh elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi dengan

disertai emisi dari foton yang disebut sinar X karakteristik (Gambar 2.7) (Winata, 2011).



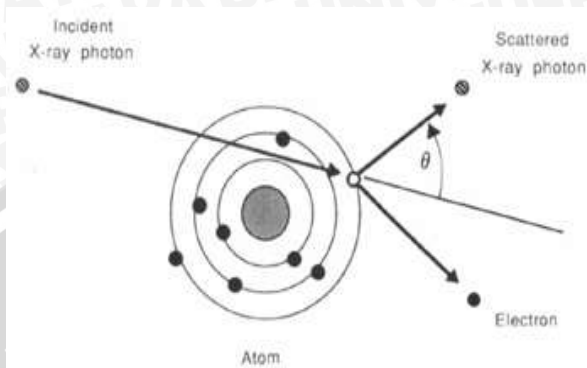
Gambar 2.7 Proses terjadinya sinar X karakteristik (<https://ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/xrays.htm>)

2.6.2 Interaksi Sinar X dengan Materi

Interaksi antara sinar X dengan materi akan terjadi ketika radiasi sinar X tersebut mengenai suatu materi. Interaksi sinar X dengan materi yang mengenainya ada tiga macam proses yaitu :

1. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah peristiwa terlepasnya elektron (photoelektron) dari orbitalnya ketika atom menyerap seluruh energi foton yang mengenainya akibat disinari dengan cahaya atau gelombang elektromagnetik. Elektron-elektron yang dilepaskan merupakan elektron-elektron pada kulit bagian dalam seperti kulit K. Efek fotolistrik terjadi pada energi foton rendah kira-kira 50 keV (Halliday dan Resnick, 1999).

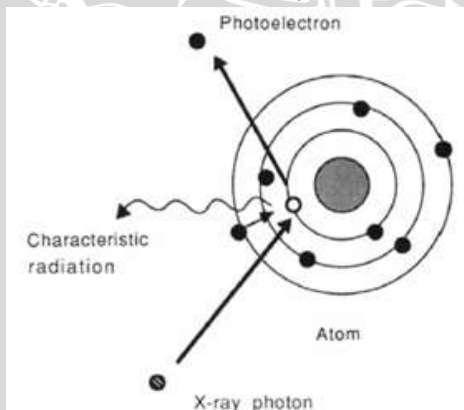


Gambar 2.8 Efek fotolistrik

(<https://ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/xrays.htm>)

2. Efek Hamburan Compton

Efek hamburan Compton adalah peristiwa terjadinya tumbukan antara foton dan elektron dalam suatu atom yang mengakibatkan sebagian energi foton menjadi energi gerak elektron dan sebagian energi hamburan foton (BATAN, 2008). Efek Compton terjadi pada elektron-elektron bebas atau elektron yang terikat secara lemah pada lapisan kulit terluar (Halliday dan Resnick, 1999).

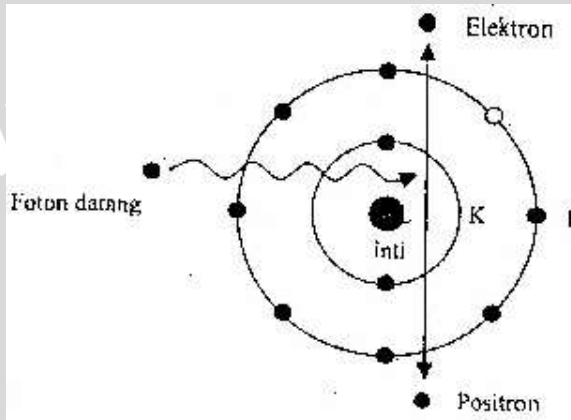


Gambar 2.9 Efek hamburan Compton

(<https://ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/xrays.htm>)

3. Produksi Pasangan

Produksi pasangan adalah proses terbentuknya pasangan elektron dan positron ketika energi foton diserap seluruhnya oleh pengaruh medan inti atom. Produksi pasangan hanya dapat terjadi pada level energi yang sangat tinggi (di atas 1 Mev). Foton dengan energi tinggi dapat menembus inti atom sehingga inti atom ikut terlibat dalam interaksi tumbukan (BATAN, 2008).



Gambar 2.10 Skema produksi pasangan (Wisnu, 1988).

2.6.3 Pesawat Sinar X

Pesawat sinar X adalah alat yang pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Jerman, Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1845, yang digunakan untuk melakukan diagnosa medis dengan menggunakan sinar X (Adidrajat, 2013). Sinar-X yang dipancarkan dari tabung diarahkan pada bagian tubuh yang akan didiagnosa. Berkas sinar-X tersebut akan menembus bagian tubuh dan akan ditangkap oleh film, sehingga akan terbentuk gambar dari bagian tubuh yang disinari. Pengoperasian pesawat sinar X memerlukan setting parameter terlebih dahulu untuk mendapatkan sinar X yang diinginkan, yaitu tegangan tinggi tabung (kV), arus tabung (mA), dan waktu paparan (s) (Sugiratu, 2012).

Pengaturan tegangan tabung (kV) akan menyebabkan perubahan gravitasi anoda terhadap elektron sehingga kecepatan elektron ketika menumbuk target akan berubah. Hal ini menyebabkan energi sinar X dan intensitas sinar X yang dihasilkan

akan mengalami perubahan. Semakin besar tegangan (kV), maka semakin besar pula energi dan intensitas sinar X yang dihasilkan. Pengaturan arus mA akan menyebabkan perubahan jumlah elektron yang dihasilkan filamen dan intensitas berkas elektron sehingga mempengaruhi intensitas sinar X. Semakin besar mA akan menghasilkan intensitas sinar X yang semakin besar (Adidrajat, 2013).

2.7 Kualitas Radiasi (*Radiation Quality*)

Kualitas radiasi atau kualitas berkas adalah kemampuan dari berkas radiasi sinar X dalam menembus suatu bahan yang dinyatakan dalam *Half Value Layer* (HVL). HVL dari radiasi sinar X merupakan ketebalan dari bahan penyerap yang dapat mengurangi nilai laju kerma udara dari sinar X menjadi 50% nilai awalnya. Ketergantungan kualitas radiasi terhadap HVL dinyatakan dalam aluminium (Al) dan tembaga (Cu), yaitu untuk aluminium (Al) digunakan pada sinar X dengan tegangan tabung hingga 100 kV dan tembaga (Cu) digunakan pada sinar X dengan tegangan tabung diatas 100 kV (Raad dan Kuiper, 2007).

2.8 Fantom

Fantom merupakan suatu perangkat yang mewakili atau menyerupai tubuh manusia dengan bahan yang bersifat dapat menyerap dan menyerupai jaringan biologi manusia (Hiswara, 1994). Dalam penelitian ini digunakan jenis fantom *slab* berbentuk *solid* (padat) yang terbuat dari material PMMA (*polymethyl methacrylate*).

Fantom yang digunakan untuk kalibrasi dibedakan menjadi tiga macam yaitu :

1. Fantom papan (*Slab Phantom*)

Fantom yang mewakili torso atau tubuh manusia dan memiliki kedalaman 30 cm x 30 cm x 15 cm dan terbuat dari material PMMA (*polymethyl methacrylate*) dengan densitas 1,19 g/cm³. Fantom ini digunakan untuk pemantauan dosimeter seluruh tubuh yang di pakai di tubuh.

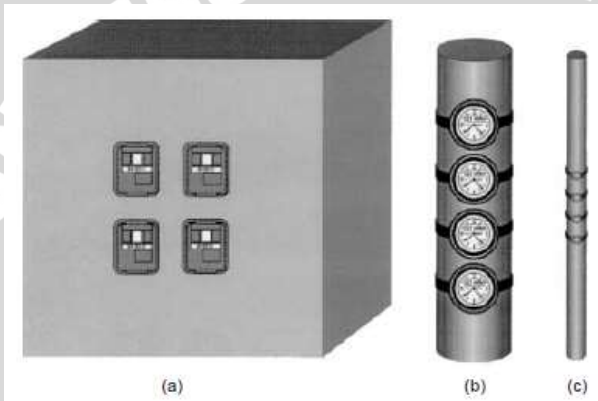
2. Fantom Tiang (*Pillar Phantom*)

Fantom yang mewakili pergelangan kaki atau pergelangan tangan dan terbuat dari material PMMA (*polymethyl methacrylate*)

dengan bentuk silinder bundar dengan diameter 73 mm dan panjang 300 mm. Fantom ini digunakan untuk pemantauan dosimeter yang di pakai di pergelangan tangan atau kaki.

3. Fantom Batang (*Rod Phantom*)

Fantom yang mewakili jari-jari yang terbuat dari material PMMA (*polymethyl methacrylate*) dengan bentuk silinder bundar dengan diameter 19 mm dan panjang 300 mm. Fantom ini digunakan untuk pemantauan dosimeter tangan yang di pakai di jari-jari (IAEA, 2000).



Gambar 2.11 (a) Fantom papan, (b) Fantom tiang, (c) Fantom batang (IAEA, 2000).

2.9 Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi adalah suatu perlakuan atau tindakan untuk membatasi segala macam bentuk yang berkaitan dengan pemanfaatan radiasi. Berdasarkan *Basic Safety Standard* (BSS), prinsip proteksi radiasi terbagi menjadi tiga azas yaitu :

a. Justifikasi,

Justifikasi yaitu semua bentuk atau hal yang berkaitan dengan radiasi atau melibatkan pemanfaatan radiasi harus memberikan manfaat atau keuntungan atau nilai lebih yang nyata. Justifikasi dapat ditentukan dengan mempertimbangkan keuntungan dan kerugiannya.

b. Optimasi

Optimasi yaitu semua bentuk atau hal yang berkaitan dengan radiasi atau melibatkan pemanfaatan radiasi diusahakan

pemakaiannya harus ditekan serendah mungkin (*As Low As Reasonably Achievable* atau sering disebut ALARA).

c. Limitasi

Limitasi yaitu setiap pemanfaatan radiasi harus diusahakan agar penerimaan dosis radiasi tidak boleh melebihi atau melampaui nilai batas dosis (NBD) yang telah ditentukan (IAEA, 1996).

2.10 Nilai Batas Dosis (NBD)

Nilai batas dosis adalah nilai batas dosis radiasi terbesar yang diterima oleh pekerja radiasi dalam jangka waktu tertentu dan telah ditetapkan oleh BAPETEN selaku badan atau instansi khusus yang menangani tentang pemanfaatan atau pemantauan radiasi. Berdasarkan PERKA (Peraturan Kepala) BAPETEN No. 4 Tahun 2013, NBD yang berlaku untuk evaluasi dosis pada pekerja radiasi adalah :

- a. Dosis Efektif rata-rata sebesar 20 mSv per tahun dalam periode 5 tahun, sehingga dosis yang terakumulasi dalam 5 tahun tidak boleh melebihi 100 mSv.
- b. Dosis Efektif sebesar 50 mSv dalam satu tahun tertentu.
- c. Dosis Ekuivalen untuk lensa mata rata-rata sebesar 20 mSv per tahun dalam periode 5 tahun dan 50 mSv dalam 1 tahun tertentu.
- d. Dosis ekuivalen untuk kulit, tangan dan kaki sebesar 500 mSv per tahun (BAPETEN, 2013).

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 1 Februari 2016 sampai dengan tanggal 2 Mei 2016 di Laboratorium Metrologi Radiasi Nasional (LMRN) Kawasan Mampang, Jakarta Selatan dan PTKMR BATAN kawasan Pasar Jumat, Jakarta Selatan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.2.1 Alat

- Detektor *Ionization Chamber* 600 cc Model/No. Seri NE 2575C/576
- Elektrometer PTW UNIDOS *Webline* Model/ No. Seri T 10022/00268
- Elektrometer *Farmer Dosemeter* Model/No. Seri NE 2570/1B/1319
- Filter Aluminium Pesawat Sinar X
- Kolimator B4-40 (belakang) dan B3-80 (depan)
- Barometer
- Termometer
- Hygrometer
- Laser
- Alat Penunjang (Selotip, *Cutter*, Kertas, dan alat tulis lainnya)
- TLD *Badge Reader* TL 1010 Nucleonix
- 1 Set Komputer
- Tabung Nitrogen
- Oven *Annealing*
- Meja Dudukan Fantom
- Meja Kalibrasi
- Meteran
- Kabel Penghubung

3.2.1 Bahan

- Sumber Radioaktif Cs-137
- Sumber Radioaktif Sr-90
- Pesawat Sinar X YXLON MGC 41
- TLD CaSO₄:Dy Buatan BARC dengan holder
- Fantom *Solid Water* PMMA ukuran 30 x 30 x 15 cm³

Gambar peralatan dan bahan yang digunakan untuk penelitian ditunjukkan pada Lampiran 1.

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan lima tahapan utama yaitu tahap persiapan yang dimulai dari persiapan *annealing*, penyinaran keseragaman dan pengelompokan TLD CaSO₄:Dy. Tahap berikutnya adalah pengecekan kestabilan sistem instrumen dosimeter, pengukuran kerma standar, penyinaran kalibrasi pesawat sinar X (tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV), pembacaan respon TLD CaSO₄:Dy dan pengolahan data yaitu berupa pembuatan kurva kalibrasi sinar X energi rendah dan pembuatan kurva terompet sinar X energi rendah. Dalam penelitian ini, tahap penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 3.10.

3.3.1 Persiapan

3.3.1.1 *Annealing*

Tahapan awal dari penelitian ini adalah proses *annealing* TLD CaSO₄:Dy buatan BARC. *Annealing* adalah suatu proses termal yang digunakan untuk membuang atau menghapus semua informasi radiasi tersimpan yang disebabkan oleh penyinaran sebelumnya atau radiasi lingkungan dari penyimpanan material TLD sebelum digunakan. *Annealing* bertujuan untuk mengembalikan kembali kondisi material dan menstabilkan struktur trap dari material kristal pada TLD (Verdianto, 2012).

Proses *Annealing* dilakukan dengan menggunakan oven dengan suhu 230°C selama 3 jam, seperti pada Gambar 3.1. Proses ini dilakukan dibawah suhu yang direkomendasikan oleh pihak pabrik pembuatan TLD yaitu pada suhu 240°C. Hal ini agar

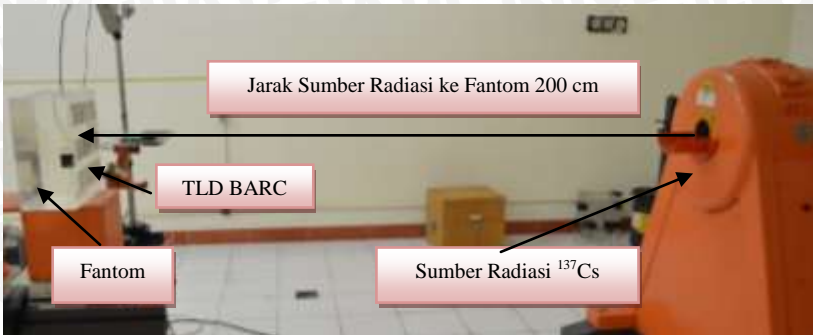
sensitivitas daripada TLD sendiri tidak menurun secara signifikan (Kusumawati, dkk., 2004). Setelah proses *annealing* dilakukan, kemudian TLD dидiamkan dan didinginkan pada suhu ruang, kemudian dilakukan pemberian label atau nama identitas pada masing-masing TLD untuk memberikan perbedaan identitas pada saat dilakukan penyinaran. Setelah dilakukan pemberian label pada masing-masing TLD, kemudian TLD dimasukkan ke dalam *holder* atau TLD *badge*.



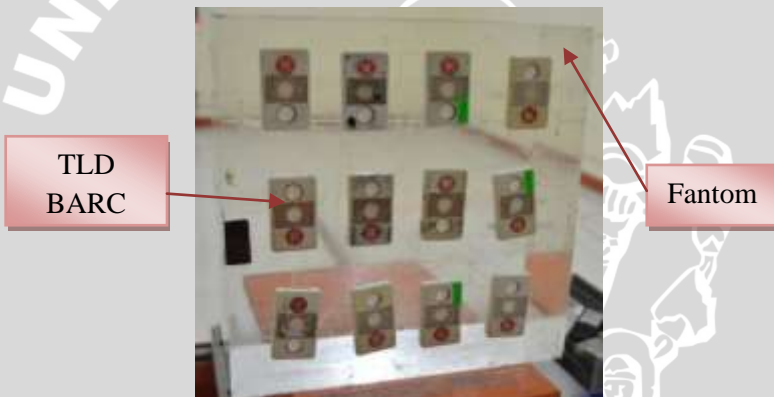
Gambar 3.1 Proses *annealing* dengan menggunakan oven sebelum penyinaran

3.3.1.2 Penyinaran Keceragaman TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Penyinaran keceragaman pada TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC dapat dilakukan setelah dilakukannya proses *annealing* dan pemberian label identitas pada TLD. Uji keceragaman dilakukan pada 50 buah TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ yang disinari dengan sumber radiasi standar ^{137}Cs pada jarak 200 cm dan menggunakan fantom *solid water* dengan dosis 1 mSv, seperti pada Gambar 3.2 dengan 2 buah TLD yang digunakan sebagai kontrol latar belakang (*background*). Setiap 12 buah dosimeter TLD disusun dan ditempel pada fantom untuk sekali penyinaran seperti pada Gambar 3.3. Dalam proses penyinaran ini dilakukan 4 kali penyinaran dengan 48 buah TLD yang akan digunakan. Penyinaran dilakukan dengan waktu 7 menit 5 detik. TLD dapat dibaca menggunakan TLD *badge reader* TL 1010 Nucleonix setelah dilakukan penyinaran keceragaman terlebih dahulu.



Gambar 3.2 Penyinaran keseragaman TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dengan menggunakan sumber radiasi standar ^{137}Cs



Gambar 3.3 Penyusunan TLD pada fantom

Proses penyinaran keseragaman TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ digunakan untuk dapat melihat tanggapan respon dari elemen D1, D2 dan D3 terhadap radiasi yang kemudian akan digunakan untuk menganalisa keseragaman tanggapan respon dari TLD tersebut.

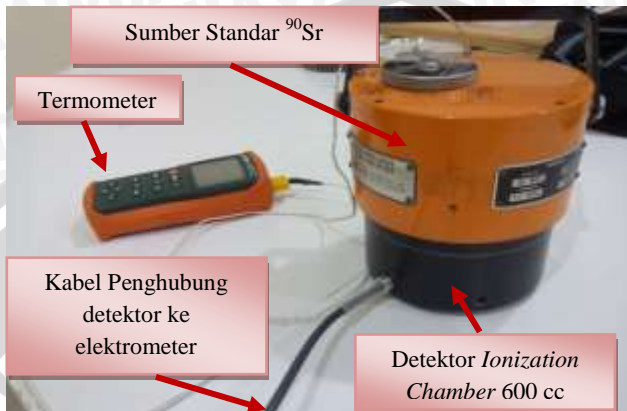
3.3.1.3 Pengelompokan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Dari hasil analisa keseragaman TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ maka dapat dilakukan pengelompokan TLD yang memiliki sensitivitas respon terhadap radiasi yang seragam atau memiliki standar deviasi yang rendah. TLD yang seragam akan dikelompokkan menjadi masing-

masing 4 buah TLD pada setiap dosis yang akan dilakukan penyinaran. Menurut Oberhofer dan Scharmann (1992), pengelompokan TLD dapat dilakukan dengan memperhatikan simpangan atau nilai variasi dari sensitivitas respon yang tidak melebihi 9% (Oberhofer dan Scharmann, 1992). Sehingga TLD dapat digunakan untuk penyinaran.

3.3.2 Pengecekan Kestabilan Sistem Instrumen Dosimeter

Pengecekan kestabilan pada detektor *Ionization Chamber* 600cc terlebih dahulu dilakukan sebelum proses pengukuran kerma standar yaitu dengan cara detektor *Ionization Chamber* 600cc dimasukkan ke dalam sumber standar Stronsium-90 (^{90}Sr) dan dihubungkan dengan termometer, seperti pada Gambar 3.4. Detektor *Ionization Chamber* 600cc kemudian dihubungkan dengan elektrometer Farmer Dosemeter Model/No. Seri NE 2570/1B/1319 yang diletakkan pada ruang berbeda dengan ruang yang digunakan untuk penyinaran dan dihubungkan ke sumber tegangan. Elektrometer diberikan tegangan sebesar 250 Volt. Detektor *Ionization Chamber* 600cc kemudian dibiarkan terpapar sumber standar ^{90}Sr selama 10-15 menit. Setelah dibiarkan terpapar selama 10-15 menit, kemudian dilakukan pembacaan paparan sumber ^{90}Sr terhadap detektor *Ionization Chamber* 600cc pada elektrometer *Farmer Dosemeter*. Pengambilan data sebanyak 10 kali yang dilakukan pada elektrometer *Farmer Dosemeter* dengan hasil bacaan yang dinyatakan dalam satuan muatan Coulomb (C).



Gambar 3.4 Detektor *Ionization Chamber* 600cc yang dipapari dengan sumber standar ^{90}Sr dalam proses pengecekan kestabilan.

Detektor *Ionization Chamber* 600cc yang telah diketahui kestabilannya, kemudian detektor *Ionization Chamber* 600cc dihubungkan dengan elektrometer PTW UNIDOS *Webline* yang diletakkan di ruang terpisah dengan ruang yang digunakan untuk penyinaran dan kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan, dan dibiarkan terlebih dahulu selama 10-15 menit. Hal ini dilakukan untuk pemanasan alat baik detektor maupun elektrometer agar kestabilannya terjaga. Setelah dilakukan pemanasan pada semua sistem instrumen yang akan digunakan, kemudian dilakukan pengecekan kebocoran arus terhadap sistem pengukuran dengan memberikan nilai tegangan nol (0) pada elektrometer terhadap detektor. Jika kebocoran arus terhadap sistem pengukuran tidak terjadi dalam detektor dan elektrometer apabila diberikan nilai tegangan nol (0) maka pada elektrometer akan terbaca nilai pengukuran muatan yang sama dengan tegangan yang diberikan yaitu sebesar nol (0).

3.3.3 Pengukuran Kerma Standar Sumber Radiasi

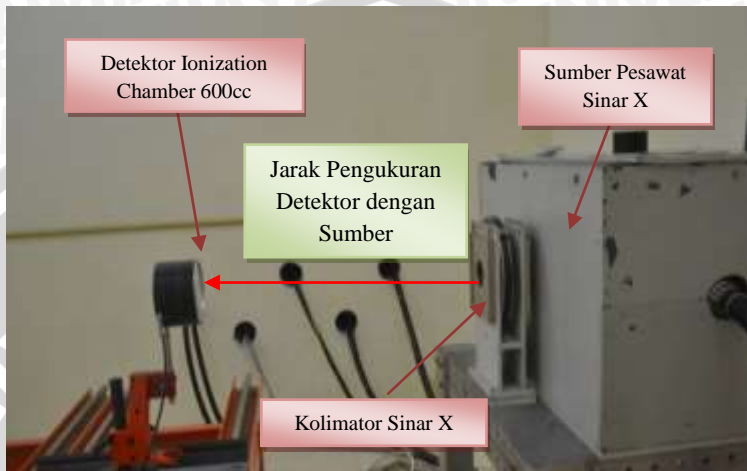
Pengukuran kerma standar dapat dilakukan apabila pengecekan kestabilan pada detektor *Ionization Chamber* 600cc dan pengecekan kebocoran arus terhadap sistem instrumen pengukuran telah dilakukan. Pengukuran kerma standar dilakukan pada sumber radiasi pesawat sinar X tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV dengan jarak pengukuran antara pusat sumber dengan pusat detektor adalah 200 cm. Posisi detektor dan posisi sumber radiasi harus dipastikan berada dalam satu garis lurus dan tegak lurus dengan cara menggunakan bantuan *laser*.

Pengecekan nilai kualitas radiasi untuk masing-masing energi sebaiknya dilakukan terlebih dahulu sebelum pengukuran laju kerma udara standar sumber radiasi sinar X energi rendah. Hal ini untuk diketahui dapat atau tidaknya berkas radiasi menembus bahan. Filter HVL dan filter tambahan (*added filter*) yang digunakan sesuai dengan data pengukuran HVL standar dan filter tambahan untuk masing-masing energi yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Pesawat sinar X terlebih dahulu dilakukan pemanasan sesuai dengan petunjuk yang terdapat pada buku panduan manual pesawat sinar X. Detektor *Ionization Chamber* 600 cc dihubungkan dengan elektrometer PTW UNIDOS *Webline*. Kemudian dilakukan pemanasan detektor dan elektrometer selama 30 menit dan dilakukan pengaturan nilai tegangan tabung, arus, FoC dan waktu penyinaran pada kontrol panel pesawat sinar X. Penyinaran kemudian dilakukan terhadap detektor dengan menggunakan filter tambahan untuk masing-masing energi. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali. Setelah dilakukan pengambilan data, kemudian diletakkan filter HVL diantara filter tambahan dan detektor dengan ketebalan tertentu pada filter HVL untuk masing-masing energi. Kemudian dilakukan penyinaran kembali dan pengambilan data sebanyak 5 kali. Selanjutnya dilakukan perbandingan nilai keluaran sinar-X yang terbaca pada detektor antara penyinaran tanpa menggunakan filter HVL dan penyinaran dengan menggunakan filter HVL. Nilai keluaran dari pesawat sinar X akan terserap setengahnya oleh filter HVL sehingga terbaca pada detektor sebesar 50% dari nilai awalnya tanpa filter HVL dengan toleransi sebesar $\pm 1\%$.

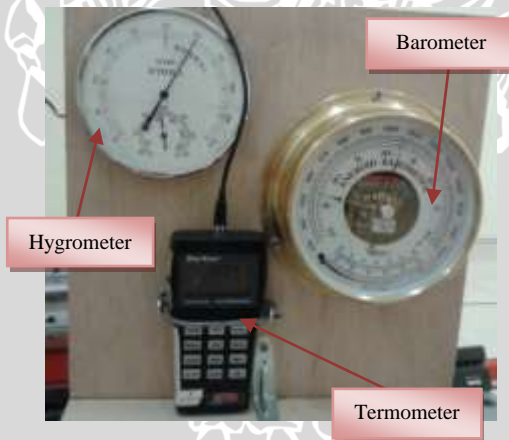
Tabel 3.1 Karakteristik kualitas radiasi sinar X energi rendah

Tegangan Tabung (kV)	Energi Efektif (keV)	HVL (mmAl)	Added Filter (mmAl)
15	12,7	0,14 mmAl	0,39 mmAl
20	16,5	0,32 mmAl	0,75 mmAl
25	20,4	0,66 mmAl	1,81 mmAl

Pengukuran kerma standar sumber radiasi sinar X energi rendah dapat dilakukan setelah proses pengecekan nilai kualitas radiasi. Pengukuran laju kerma udara standar sinar-X energi rendah dilakukan dengan pengaturan ulang nilai tegangan tabung, arus, FoC serta waktu penyinaran dalam menit pada kontrol panel sesuai dengan energi sinar-X yang digunakan. Detektor disinari dengan menggunakan sumber radiasi pesawat sinar X seperti pada Gambar 3.5. Sistem instrumen pengukuran dan sumber terlebih dahulu dibiarkan selama 10-15 menit sebelum dilakukannya pengambilan data laju dosis standar. Hal ini dimaksudkan untuk proses penyesuaian antara paparan sumber radiasi dengan detektor dan elektrometer. Pembacaan laju dosis cacah *background* (latar belakang) dari ruang penyinaran juga dilakukan selama pengukuran dan pengambilan data kerma standar. Serta pembacaan nilai temperatur, tekanan serta kelembaban ruang juga dilakukan sebagai faktor koreksi dari pengukuran laju dosis standar seperti pada Gambar 3.6. Pengambilan data pengukuran kerma dilakukan sebanyak 10 kali untuk masing-masing penyinaran selama 1 menit.



Gambar 3.5 Pengukuran kerma standar pesawat sinar X



Gambar 3.6 Hygrometer, termometer dan barometer



Gambar 3.7 Mesin kontrol pesawat sinar X

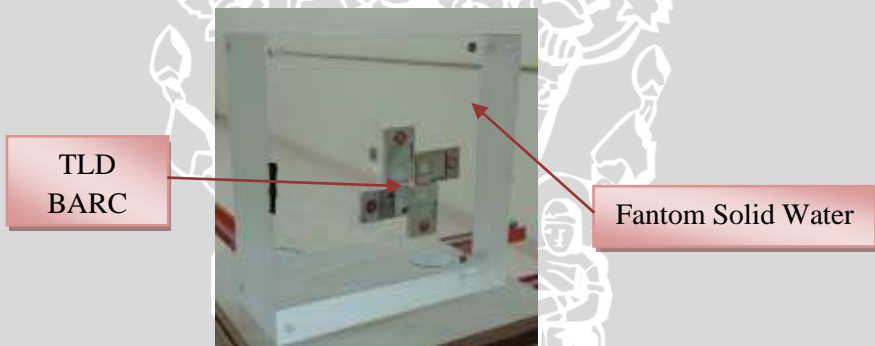
3.3.4 Penyinaran Kalibrasi Pesawat Sinar X

Penyinaran kalibrasi terhadap TLD BARC dilakukan dengan menggunakan sumber radiasi pesawat sinar X dengan energi menurut ISO 4037-4 yaitu 12,7 keV, 16,5 keV dan 20,4 keV. Penyinaran kalibrasi dilakukan dengan jarak pengukuran fantom dengan sumber radiasi yaitu 200 cm sesuai dengan ketentuan standar penyinaran dan menggunakan berkas sempit (*narrow beam*) dengan kolimator depan tipe B3-80 dan kolimator belakang tipe B4-40. TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ diletakkan pada fantom *solid water* berukuran $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ seperti pada Gambar 3.8. Penyinaran kalibrasi dilakukan dengan variasi dosis antara 0,1 mSv; 0,3 mSv; 0,5 mSv; 1 mSv; 1,5 mSv dan 3 mSv. Pada penyinaran kalibrasi ini digunakan sebanyak 48 buah TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ untuk penyinaran dan 2 buah TLD untuk kontrol latar belakang (*background*). TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ yang akan dilakukan penyinaran disusun seperti pada Gambar 3.9. TLD disusun demikian agar paparan radiasi tepat mengenai TLD yang ingin dievaluasi tanggapan responnya.

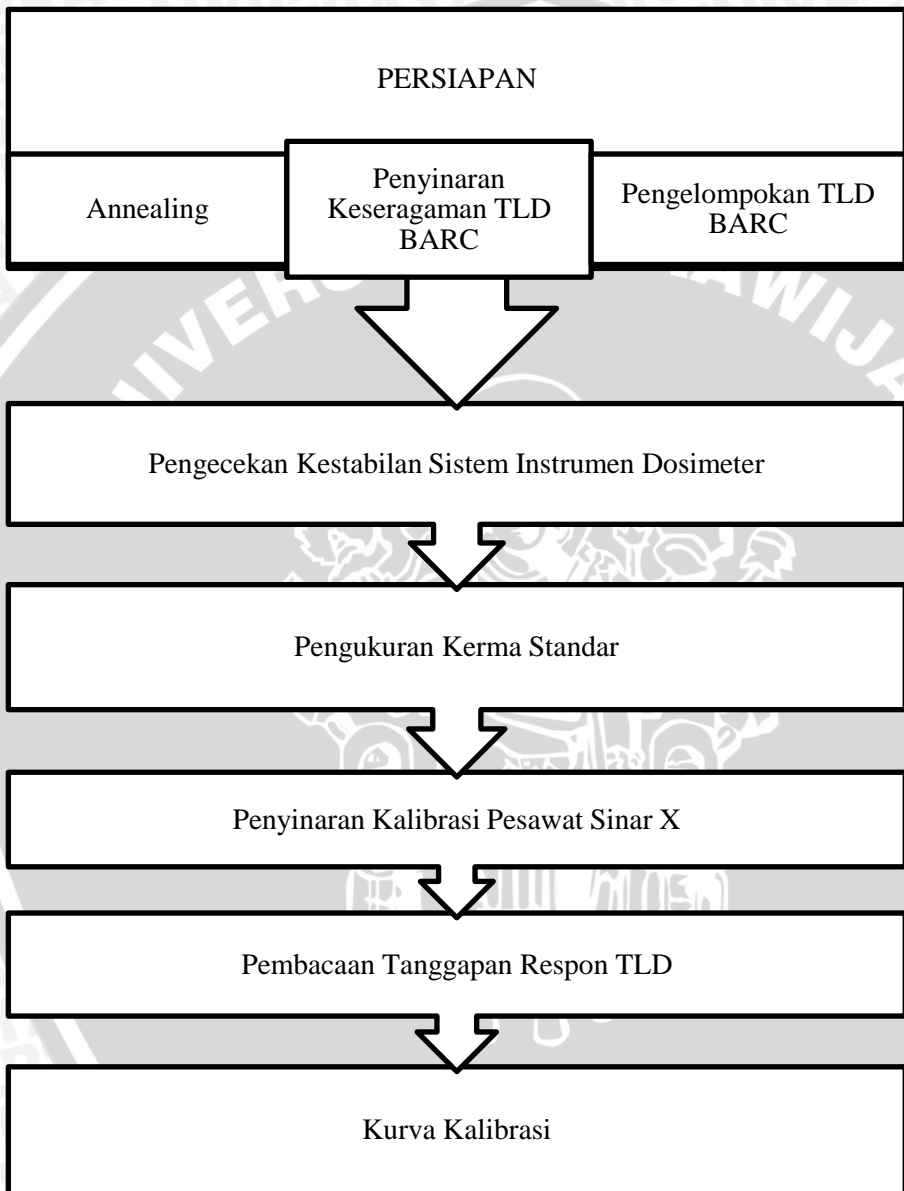
Pembacaan tanggapan yang diterima oleh TLD dapat dilakukan setelah proses penyinaran kalibrasi dengan sumber radiasi pesawat sinar X tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV yaitu dengan alat TLD *badge reader* TL 1010 Nucleonix yang terdapat di PTKMR BATAN Kawasan Pasar Jumat, Jakarta Selatan.



Gambar 3.8 Penyinaran TLD pada fantom dengan sumber radiasi pesawat sinar X



Gambar 3.9 Penyusunan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ saat akan dilakukan penyinaran



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

3.3.5 Pengolahan Data

3.3.5.1 Penentuan Kerma Udara dan Dosis Ekuivalen Perorangan Hp(10)

Penentuan kerma udara digunakan untuk dapat menentukan dosis ekuivalen perorangan Hp(10). Data hasil pengukuran dari detektor *Ionization Chamber* 600cc pada elektrometer PTW UNIDOS Webline ditampilkan dalam bentuk cacahan muatan listrik nano Coulomb tiap satu menit (Coulomb). Hasil tersebut kemudian diubah menjadi kerma udara dengan menggunakan Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$\dot{K}_u = \left[M \times N_k \times \frac{P_o}{P} \times \frac{(T + 273.15)}{(T_o + 273.15)} \right] \times 60 \text{ menit} \quad (3.1)$$

Keterangan :

\dot{K}_u : Laju kerma udara ($\mu\text{Gy/h}$)

M : Hasil pengukuran (nC/menit)

N_k : Faktor kalibrasi detektor ($\mu\text{Gy/nC}$)

P_o : Tekanan udara standar (1013 mbar)

P : Tekanan udara pada pengukuran (mbar)

T_o : Suhu standar ($+20^0 \text{C}$)

T : Suhu pada pengukuran (^0C)

Tabel 3.2 Faktor kalibrasi detektor *Ionization Chamber* 600cc

Tegangan tabung (kV)	Energi efektif (keV)	Faktor Kalibrasi Detektor N_k ($\mu\text{Gy/nC}$)
15	12,7	47,20
20	16,5	46,20
25	20,4	45,20

Nilai besaran kerma udara yang telah didapatkan merupakan nilai kerma standar yang dapat diubah dan dikonversi menjadi

besaran dosis ekuivalen perorangan Hp (10) dengan menggunakan Persamaan 3.2 sebagai berikut.

$$\dot{H}_p(10) = \dot{K}_u \times F_{\text{konversi}} \quad (3.2)$$

Keterangan :

$H_p(10)$: Dosis Ekuivalen Perorangan ($\mu\text{Sv/h}$)

K_u : Kerma Udara ($\mu\text{Gy/h}$)

F_{konversi} : Faktor konversi $\dot{H}_p(10)/\dot{K}_u$ ($\mu\text{Sv}/\mu\text{Gy}$)

Tabel 3.3 Faktor konversi (IAEA, 2000).

Tegangan Tabung (kV)	Energi Effektif (keV)	Faktor Konversi $\dot{H}_p(10)/\dot{K}_u$ (Sv/Gy)
15	12,7	0,06
20	16,5	0,27
25	20,4	0,55

3.3.5.2 Penentuan Lama Waktu Penyinaran

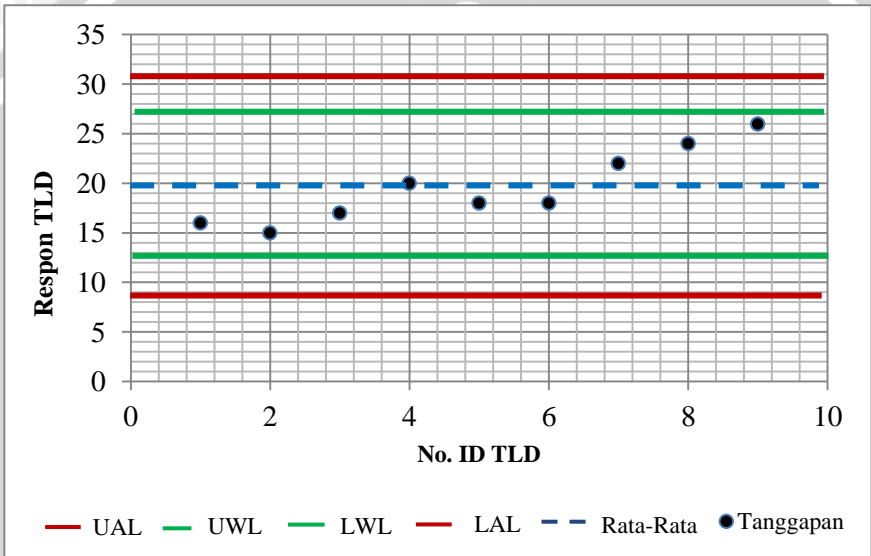
Lama waktu penyinaran adalah lama waktu yang dibutuhkan atau yang diperlukan untuk melakukan penyinaran pada dosis tertentu. Lama waktu penyinaran dapat dihitung dan diperoleh dari Persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$t = \frac{\text{Dosis yang diinginkan (mSv)}}{\text{Dosis Ekuivalen Perorangan (mSv/menit)}} \quad (3.3)$$

3.3.5.3 Penentuan Nilai Variasi Keseragaman

Penentuan nilai variasi keseragaman dilakukan dengan menggunakan SPC (*Statistic Process Control*). Respon elemen Disk D1 TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dimasukkan dalam peta kendali seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.11. Pada penentuan nilai variasi keseragaman, selama respon TLD berada dalam Batas Bawah Peringatan (LWL) dan Batas Atas Peringatan (UWL), maka TLD dinyatakan memiliki keseragaman dan dapat digunakan untuk penyinaran. Dan apabila tanggapan respon TLD berada diluar Batas Bawah Peringatan (LWL) dan Batas Atas Peringatan (UWL), maka harus dilakukan penyinaran ulang. Apabila tanggapan respon TLD

berada di luar Batas Aksi Atas (UAL) dan Batas Aksi Bawah (LAL), maka tanggapan respon TLD yang berada diluar batas tersebut harus dihilangkan. Persamaan Batas Atas dan Batas Bawah secara umum sama seperti persamaan kendali (UCL dan LCL), yang ditunjukkan pada Persamaan 3.5, 3.6, dan Persamaan 3.7 [41]. Besar simpangan yang dihasilkan tidak boleh lebih besar dari 9% (Oberhofer dan Scharmann, 1992).



Gambar 3.11 Peta kendali

$$\text{Batas Kendali Atas (UCL)} = \mu_r + k\sigma_r \quad (3.5)$$

$$\text{Batas Kendali Bawah (LCL)} = \mu_r - k\sigma_r \quad (3.6)$$

$$\text{Nilai Variasi Respon} = \frac{\sigma_r}{\mu_r} \times 100\% \quad (3.7)$$

Keterangan :

μ_r = Nilai rata-rata dari tanggapan TLD

k = Jarak batas kendali atau tingkat kepercayaan dalam pengamatan (k bernilai 2 untuk UWL dan LWL dan k bernilai 3 untuk UAL dan LAL)

σ_r = Standar deviasi dari tanggapan TLD atau simpangan dengan tingkat ketelitian dalam pengamatan

Pada peta kendali (Gambar 3.11) ditunjukkan sumbu x merupakan nomor ID TLD dan sumbu y merupakan tanggapan dari TLD. Apabila titik tanggapan yang diperoleh masih berada pada garis Batas Atas Peringatan (UWL) dan Batas Bawah Peringatan (LWL), maka TLD tersebut memiliki tanggapan yang seragam dan dapat digunakan untuk penyinaran. Sedangkan apabila tanggapan TLD berada di luar UWL dan LWL tetapi masih dalam garis Batas Aksi Atas (UAL) dan Batas Aksi Bawah (LAL), maka TLD tersebut harus diberi perlakuan penyinaran kembali agar tanggapan TLD menjadi seragam. Dan apabila tanggapan berada di luar dari garis UAL ataupun garis LAL, maka tanggapan dari TLD tersebut tidak dapat digunakan dan dianggap tidak layak.

3.3.5.4 Penentuan Respon TLD Sinar X Energi Rendah

TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC merupakan TLD yang mempunyai tiga disk, yaitu D1, D2 dan D3, yang masing-masing dari disk tersebut digunakan untuk evaluasi dosis. Untuk radiasi foton evaluasi dilakukan pada D1. Sehingga radiasi sinar x energi rendah dapat dilakukan evaluasi dosis dari hasil bacaan tanggapan TLD pada D1.

$$\text{Sinar X Energi Rendah} = \text{D1}$$

3.3.5.5 Pembuatan Kurva Kalibrasi Sinar X Energi Rendah

Kurva kalibrasi merupakan suatu kurva yang dibuat dari hasil hubungan antara tanggapan dari TLD dan dosis penyinaran. Dengan adanya kurva kalibrasi maka dapat diperoleh faktor kalibrasi dari hubungan antara tanggapan dari TLD dan dosis penyinaran tersebut yang membentuk kelinieran garis. Sumbu y merupakan tanggapan dari TLD yang telah dilakukan penyinaran atau yang telah dipapari oleh sumber radiasi. Sedangkan sumbu x merupakan dosis yang diberikan ketika dilakukan penyinaran. Persamaan faktor kelibrasinya dapat ditulis seperti pada Persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$y = ax \pm b \quad (3.8)$$

3.3.5.6 Pembuatan Kurva Terompet

Kurva terompet merupakan kurva yang digunakan untuk mengevaluasi atau untuk menguji hasil dari kurva kalibrasi yang telah dibuat sebelumnya sebagai kurva toleransi data. Kurva ini menyerupai bentuk terompet, sehingga dapat disebut dengan kurva terompet. Apabila keseluruhan data pengukuran yang telah dilakukan tidak keluar dari garis yang telah ditetapkan IAEA dan EURADOS yang membentuk seperti terompet, maka data berupa kurva kalibrasi tersebut dinyatakan layak atau dianggap sesuai digunakan. Perhitungan IAEA dan EURADOS dapat ditunjukkan pada Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10 sebagai berikut.

IAEA, 2007

$$\frac{1}{1,5} \left(1 - \frac{2D_o}{D_T} \right) \leq \frac{D_M}{D_T} \leq 2 \quad (3.9)$$

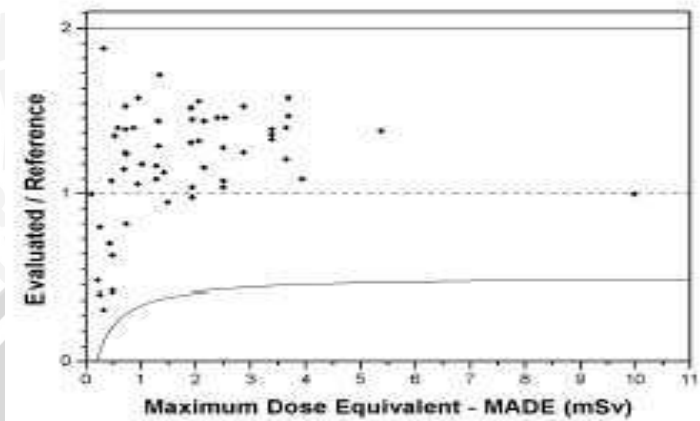
EURADOS, 1999

$$\frac{1}{1,5} \left(1 - \frac{2D_o}{D_T} \right) \leq \frac{D_M}{D_T} \leq 1,5 \left(1 + \frac{D_o}{2D_o + D_T} \right) \quad (3.10)$$

Dimana D_o adalah nilai dosis standar yang telah ditentukan, yaitu pada D_o pada IAEA adalah 0,1 mSv dan D_o pada EURADOS adalah 0,085 mSv. D_M adalah nilai dosis pengukuran dari kurva kalibrasi dan D_T adalah nilai dosis teori dari perhitungan laju dosis (Gabriel, 1996).

Kurva terompet terdiri dari sumbu x dan sumbu y. Sumbu x merupakan D_T (*True Dose*) yaitu dosis sebenarnya. Sumbu y merupakan D_M/D_T yaitu perbandingan antara dosis hasil pengukuran atau D_M (*Measurement Dose*) dengan dosis sebenarnya (D_T). Kurva terompet memiliki batas atas (Ba) dan batas bawah (Bb) yang ditetapkan oleh IAEA dan EURADOS. Batas atas (Ba) merupakan batasan toleransi maksimal data perbandingan dosis hasil pengukuran dengan dosis sebenarnya. Batas bawah (Bb) merupakan batasan toleransi minimal data perbandingan dosis hasil pengukuran dengan dosis sebenarnya.

Kurva terompet dapat dicontohkan seperti plot grafik standar dari IAEA pada Gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3.12 Kurva terompet standar IAEA (Mauricio, dkk., 2007).

3.3.5.7 Penentuan Ketidakpastian Kalibrasi

Ketidakpastian adalah suatu ketetapan dari rentang nilai yang didalamnya diperkirakan terletak nilai kuantitas yang diukur. Kesalahan kalibrasi terjadi karena pemberian nilai skala pada saat pembuatan atau kalibrasi tidak tepat. Hal ini mengakibatkan pembacaan hasil pengukuran menjadi lebih besar atau lebih kecil dari nilai sebenarnya. Ketidakpastian kalibrasi dibedakan menjadi dua macam yaitu ketidakpastian tipe A dan ketidakpastian tipe B. Ketidakpastian tipe A (U_A) berasal dari pengukuran secara langsung. Yang termasuk ketidakpastian tipe A adalah ketidakpastian statistik dan ketidakpastian daya guna (U_p). Ketidakpastian tipe A dapat dikurangi dengan cara menambahkan jumlah pengukuran. Ketidakpastian tipe B (U_B) berasal dari pengukuran sebelumnya atau dari referensi. Yang termasuk ketidakpastian tipe B adalah ketidakpastian iradiasi TLD (U_{irr}), ketidakpastian resolusi (U_{res}) dan ketidakpastian *fading* (U_{fad}).

Kombinasi dari ketidakpastian tipe A dan tipe B dapat menentukan ketidakpastian keseluruhan dari kalibrasi sistem dosimeter. Kombinasi ketidakpastian ini disebut ketidakpastian C atau U_C , yang dapat dicari dengan Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.11)$$

Ketidakpastian bentangan atau expanded (U_{exp}) diperoleh dari Persamaan 3.12 sebagai berikut.

$$U_{exp} = k \times U_C \quad (3.12)$$

Dimana k bernilai 2 untuk ketidakpastian dengan *confidence level* 95% dan U_C adalah kombinasi dari ketidakpastian tipe A dan tipe B.

Ketidakpastian statistik merupakan nilai variasi tanggapan TLD yang dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 3.13 dibawah.

$$U_{stat} = \mu_r + k\sigma_r \quad (3.13)$$

Dimana μ_r adalah rata-rata dari tanggapan TLD, k adalah jarak batas dan σ_r adalah standar deviasi dari tanggapan TLD.

Ketidakpastian resolusi (U_{res}) berhubungan dengan ketidakpastian alat yang dapat dicari dengan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$U_{res} = \frac{\text{cacahan terkecil}}{X_{rata}} \times 100 \quad (3.14)$$

Dimana X_{rata} merupakan nilai tanggapan rata-rata dari 4 dosimeter TLD.

Menurut ANSI (*American National Standard Institute*) menjelaskan bahwa prosedur untuk menguji daya guna dari sistem dosimeter harus ditinjau secara periodic dan harus sesuai dengan kriteria dari ANSI. Ketidakpastian daya guna diperoleh dari nilai simpangan terhadap teori (BIAS) yang dapat dicari dengan Persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$BIAS (P) = \frac{(D_M - D_T)}{D_T} \quad (3.15)$$

Dimana D_T adalah dosis penyinaran yang diberikan secara teori, sedangkan D_M adalah dosis yang diperoleh dengan memasukan nilai tanggapan TLD pada persamaan kurva kalibrasi. BIAS akan bernilai positif jika nilai D_T lebih besar dari nilai D_M , dan sebaliknya jika nilai D_T lebih kecil dari nilai D_M maka BIAS akan bernilai negatif. Dan ada pula ketidakpastian dari standar deviasi BIAS, $S(\sigma_p)$ yaitu seperti pada Persamaan 3.16 dibawah (Nazaroh, dkk., 2013).

$$S(\sigma_p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}{(n-1)}} \quad (3.16)$$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

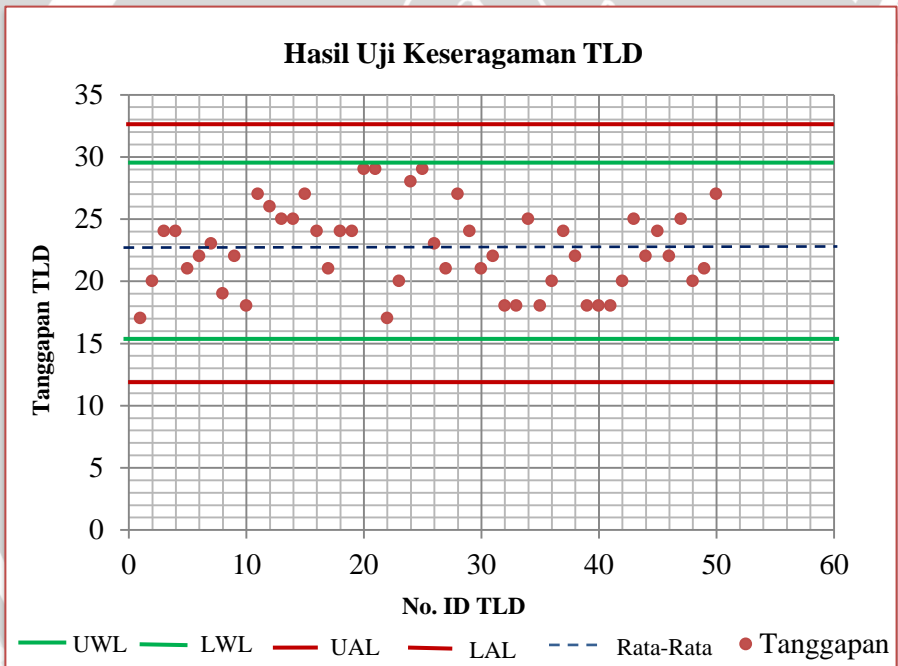
(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penyinaran Keseragaman TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Hasil penyinaran uji keseragaman pada 48 buah TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC dengan menggunakan sumber radiasi standar ^{137}Cs dengan waktu penyinaran selama 7 menit 5 detik dapat ditunjukkan pada Gambar 4.1. Analisis uji keseragaman respon TLD terhadap radiasi sinar X energi rendah dengan menggunakan kurva SPC (*Statistik Process Control*). Evaluasi keseragaman dapat diketahui dari tanggapan yang dihasilkan oleh disk 1 (D1) pada TLD BARC. Hal ini dikarenakan D1 dapat mengevaluasi dosis radiasi foton atau sinar X energi rendah.



Gambar 4.1 Hasil uji keseragaman TLD

Dari Gambar 4.1 diatas, dapat dinyatakan bahwa 48 buah TLD BARC tersebut dapat digunakan atau layak digunakan dapat

penelitian ini. Hal ini didasari oleh hasil nilai dari tanggapan TLD yang ditunjukkan berupa titik sebaran tanggapan pada grafik peta kendali tidak melewati garis batas UWL maupun LWL. Hasil sebaran nilai keseragaman tanggapan respon dari D1 pada 48 buah TLD adalah dengan rata-rata sebesar 23 nC dengan standar deviasi sebesar 7 %. Meskipun TLD memiliki bentuk ukuran, bahan dan komposisi TLD yang sama, serta dengan perlakuan, teknik dan waktu penyinaran yang sama pula tetapi dapat menghasilkan nilai tanggapan respon yang berbeda (Yulianti, dkk., 2004). Variasi dari nilai tanggapan respon yang dihasilkan TLD ini memang tidak dapat dihindari walaupun TLD dipapari dengan sumber radiasi yang sama yaitu sumber radiasi standar ^{137}Cs , dosis yang sama yaitu sebesar 1 mSv dan tingkat perlakuan yang sama dalam pelaksanaan penyinaran, tetapi kemampuan daya tanggapan respon antara TLD satu dengan yang lain berbeda-beda sesuai dengan daya papir sumber radiasi. TLD dengan susunan kristal *calcium sulfat* beraktivator *dysprosium* ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) tidak dapat dipastikan kondisi hasilnya akan sama, akan selalu terdapat kecacatan acak yang tidak dapat diperhitungkan. Hal ini dapat menyebabkan hasil cacahan dari TLD bervariasi.

Pengelompokan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dilakukan berdasarkan standar deviasi yang didapatkan untuk mengurangi simpangan data yang disebabkan karena bervariasinya nilai bacaan cacahan dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Menurut Oberhofer dan Scharmann (1992), nilai variasi keseragaman tanggapan TLD dapat ditoleransi dengan nilai standar deviasi sebesar $\pm 9\%$. Dengan hasil standar deviasi yang didapatkan sebesar 7% maka 48 buah TLD tersebut dinyatakan memenuhi kriteria dan layak digunakan.

4.2 Hasil Pengecekan Kestabilan Sistem Instrumen Dosimeter

Pengecekan kestabilan sistem instrumen dosimeter yang digunakan yaitu detektor *Ionization Chamber* 600 cc Model/No. Seri NE 2575C/576 dan elektrometer PTW UNIDOS *Webline* Model/ No. Seri T 10022/00268 yang dipapari dengan sumber radiasi ^{90}Sr didapatkan data hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil pengecekan kestabilan sistem instrumen dosimeter

Bacaan Standar (nC/250 detik)	Bacaan Pengukuran (nC/250 detik)	Standar Deviasi (%)
1,465	1,476	0,755
1,466	1,476	0,687
1,465	1,476	0,755
1,465	1,476	0,755
1,465	1,476	0,755
Standar Deviasi Rata-Rata		0,742

Dari hasil pengecekan kestabilan sistem instrumen dosimeter didapatkan nilai standar deviasi rata-rata antara bacaan standar sumber ^{90}Sr dengan bacaan pengukuran yang dilakukan untuk sumber ^{90}Sr adalah kurang dari 1% yaitu sebesar 0,742%. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa sistem dosimeter yang digunakan berada dalam kondisi stabil dan dapat digunakan. Hal ini didasari dengan syarat yang diberikan yaitu apabila nilai standar deviasi antara bacaan standar dan bacaan pengukuran kurang dari atau sama dengan 1%, maka sistem instrumen dosimeter tersebut dalam keadaan stabil atau dapat digunakan. Dan sebaliknya apabila nilai standar deviasi antara bacaan standar sumber ^{90}Sr dengan bacaan pengukuran yang dilakukan untuk sumber ^{90}Sr lebih dari 1% maka sistem dosimeter berada dalam keadaan yang tidak stabil. Hal ini dapat diakibatkan oleh ketidakstabilan dari detektor *Ionization Chamber* 600cc Model/No. Seri NE 2575C/576, elektrometer PTW UNIDOS *Webline* Model/ No. Seri T 10022/00268 atau bahkan keduanya, atau dapat terjadi saat dilakukannya pemanasan elektrometer, maupun saat dilakukannya pengecekan detektor dengan elektrometer yang berbeda yang berfungsi untuk mengetahui asal penyebab dari ketidakstabilan baik berasal dari detektor atau elektrometer yang digunakan, dan saat dilakukannya pengecekan

kelembapan elektrometer. Jika elektrometer mengalami kelembapan maka elektrometer tersebut perlu dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 40°C selama 4 jam dan juga dilakukan pengecekan terhadap silica gel didalam elektrometer untuk mengetahui apakah silica gel perlu diganti atau tidak. Setelah itu dilakukan pengeringan terhadap kabel konektor yang digunakan untuk menghindari kelembapan.

4.3 Hasil Bacaan Tanggapan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Pada penyinaran kurva kalibrasi pesawat sinar X dengan energi rendah yaitu pada tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV dan variasi dosis sebesar 0,1 mSv; 0,3 mSv; 0,5 mSv; 1 mSv; 1,5 mSv dan 3 mSv didapatkan hasil bacaan tanggapan dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dari masing-masing tegangan yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Hasil bacaan tanggapan TLD tersebut sudah dikurangi dengan bacaan latar belakang atau bacaan *background*.

Dari Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa terjadi perubahan bacaan nilai tanggapan dari TLD saat terjadinya penambahan dosis yang diberikan pada TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Terlihat bahwa bacaan nilai tanggapan TLD bertambah atau semakin tinggi saat diberikan dosis yang terkecil hingga dosis yang terbesar.

Tabel 4.2 Hasil bacaan tanggapan respon TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ pesawat sinar X

Tegangan (kV)	Dosis (mSv)	Hasil Bacaan (nC)	Ketidakpastian (%)
15	0,1	70	38
	0,3	72	10
	0,5	87	13
	1	126	10
	1,5	163	8
	3	261	7
20	0,1	46	29
	0,3	59	11
	0,5	85	13
	1	130	12
	1,5	185	15
	3	335	17
25	0,1	122	6
	0,3	179	3
	0,5	199	12
	1	298	9
	1,5	426	9
	3	746	10

Dari Tabel 4.2, dapat diketahui bahwa semakin besar dosis dan energi yang diberikan, maka semakin besar pula hasil bacaan respon yang didapatkan. Nilai cacahan tertinggi terdapat pada energi 20,4 keV atau tegangan sebesar 25 kV. Hal ini disebabkan oleh elektron yang terperangkap pada daerah perangkap tereksitasi setelah menangkap banyak energi radiasi yang diberikan dan menyebabkan bacaan nilai cacahan tanggapan yang dihasilkan saat TLD dipanaskan menjadi banyak karena banyaknya pula elektron yang terperangkap.

4.4 Hasil Kerma Standar Sinar X Energi Rendah

Kerma udara digunakan untuk dapat menentukan dosis ekuivalen perorangan Hp(10). Pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber radiasi pesawat sinar X dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali dengan hasil rata-rata dari penyinaran (M) pada jarak SDD sebesar 200 cm. Hasil laju kerma standar dengan sumber pesawat sinar X energi rendah dengan tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Data kerma udara dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10)

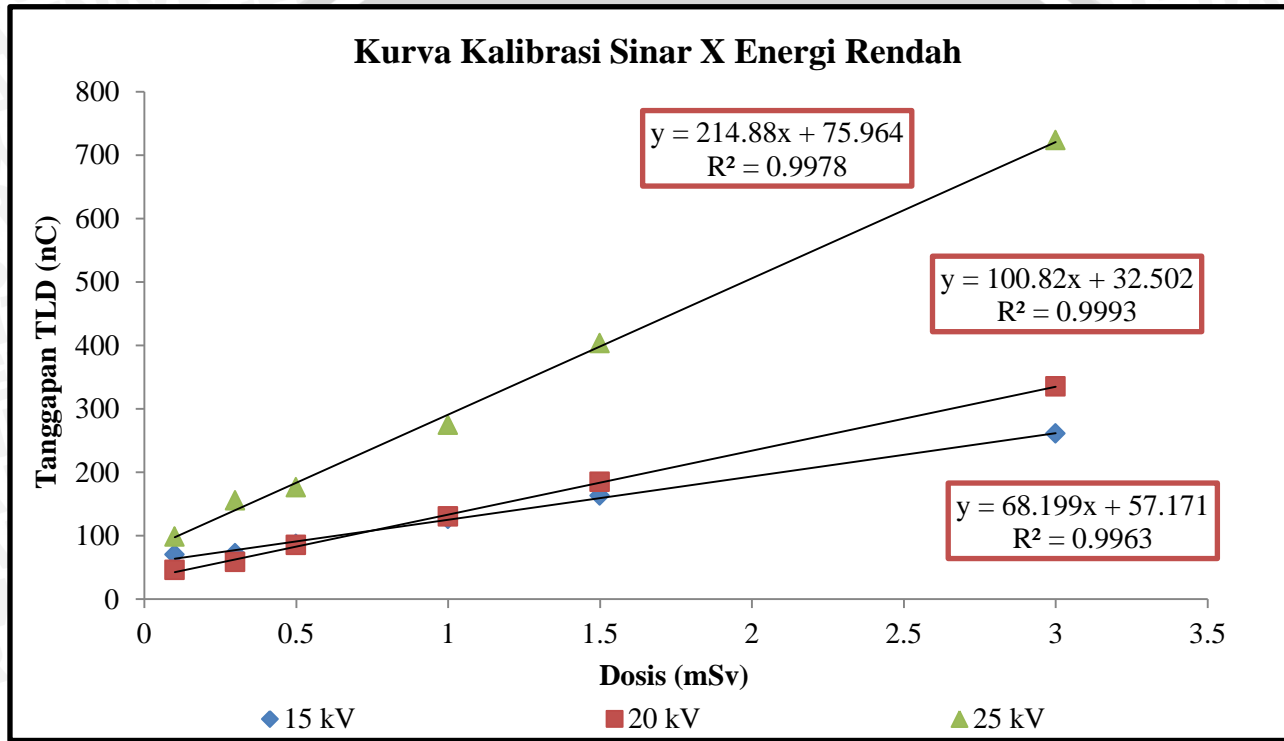
SDD (cm)	Tegangan (kV)	M (nC/menit)	Ku (μ Gy/menit)	Hp(10) (μ Sv/menit)
200	15	5,597	264,188	15,851
	20	9,475	437,757	118,195
	25	6,614	298,962	164,429

Dari data Tabel 4.3 diatas, diketahui bahwa pada tegangan 15 kV didapatkan nilai hasil penyinaran (M) sebesar 5,597 nC/menit. Laju kerma udara sebesar 264,188 μ Gy/menit dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10) sebesar 15,851 μ Sv/menit. Pada tegangan 20 kV didapatkan nilai hasil penyinaran (M) sebesar 9,475 nC/menit. Laju kerma udara sebesar 437,757 μ Gy/menit dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10) sebesar 118,195 μ Sv/menit. Dan pada tegangan 25 kV didapatkan nilai hasil penyinaran (M) sebesar 6,614 nC/menit.

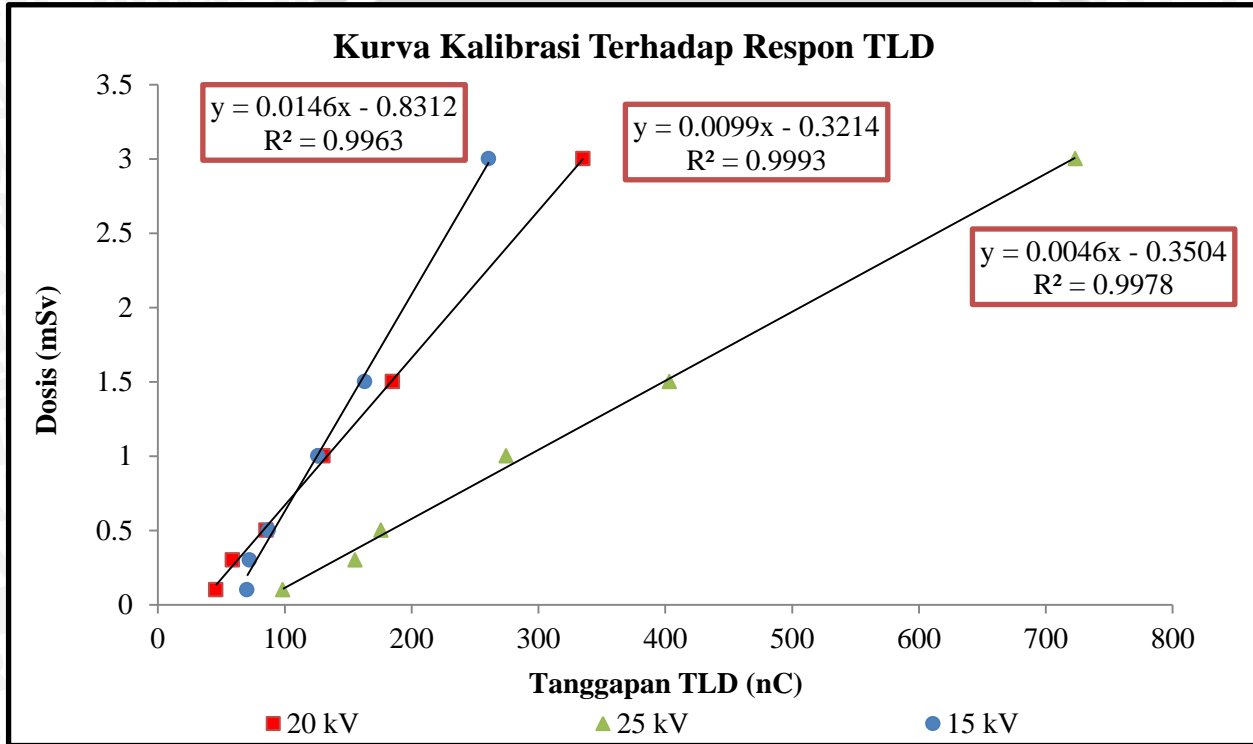
Laju kerma udara sebesar 298,962 $\mu\text{Gy}/\text{menit}$ dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10) sebesar 164,429 $\mu\text{Sv}/\text{menit}$. Dari data tersebut, diketahui bahwa dosis ekuivalen perorangan terbesar terdapat pada tegangan 25 kV yaitu sebesar 164,429 $\mu\text{Sv}/\text{menit}$ dan dosis ekuivalen perorangan Hp(10) terkecil terdapat pada tegangan 15 kV yaitu sebesar 15,851 $\mu\text{Sv}/\text{menit}$.

4.5 Kurva Kalibrasi Sinar X Energi Rendah

Kurva kalibrasi merupakan suatu kurva yang dibuat dari hasil hubungan antara tanggapan dari TLD dan dosis penyinaran yang diberikan. Beberapa penelitian menjelaskan bahwa kurva kalibrasi merupakan hubungan antara dosis radiasi dengan hasil bacaan cacahan TLD linier untuk dosis rendah hingga tinggi yaitu sebesar 10 Sv [41]. Kurva kalibrasi digunakan untuk memudahkan evaluasi dosis dari hasil bacaan nilai cacahan tanggapan TLD yang telah disinari dengan sumber radiasi yang telah dikelompokkan dalam satu kelompok penyinaran sesuai dosis yang diberikan dan berupa persamaan grafik linier. Kurva kalibrasi sinar X energi rendah dengan tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV dapat ditunjukkan pada Gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.2 Kurva Kalibrasi Sinar X Energi Rendah



Gambar 4.3 Kurva kalibrasi terhadap respon TLD

Dari kurva kalibrasi diatas (Gambar 4.2) diketahui bahwa semakin besar dosis dan energi yang diberikan maka semakin besar pula nilai bacaan tanggapan dari TLD. Hal ini disebabkan karena radiasi memberikan energi pada elektron. Kurva kalibrasi diatas dapat dinyatakan memiliki sensitivitas terhadap respon yang berbeda-beda antara masing-masing tegangan dan dosis yang diberikan. Hal ini dapat dilihat dari garis kurva kalibrasi dengan tegangan 25 kV, yaitu memiliki sensitivitas respon yang paling baik dengan rentang respon paling besar daripada tegangan yang lain.

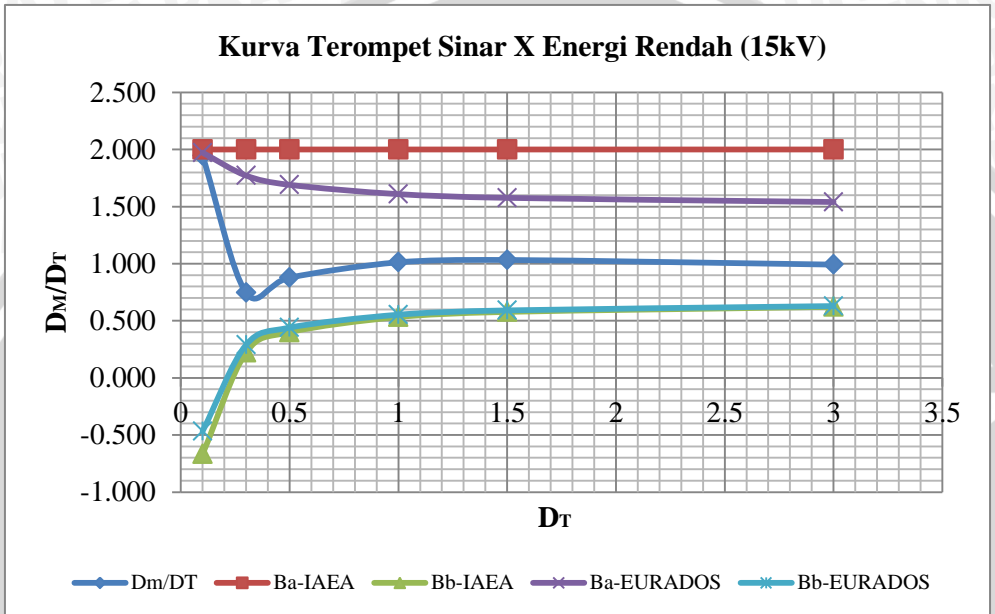
Pada tegangan sinar X sebesar 15 kV didapatkan nilai regresi sebesar 0,9963 dan gradient sebesar 0,0146. Pada tegangan sinar X 20 kV didapatkan nilai regresi 0,9993 dan gradient 0,0099. Pada tegangan sinar X 25 kV didapatkan nilai regresi sebesar 0,9978 dan gradient sebesar 0,0046. Dari ketiga tegangan sinar X tersebut, nilai regresi yang dihasilkan mendekati nilai 1. Hal ini menunjukkan bahwa kurva kalibrasi ini bisa digunakan yaitu dengan ketelitian hampir mendekati 1. Nilai regresi yang paling mendekati 1 adalah pada tegangan sinar X sebesar 20 kV, yaitu 0,9993. Gradient paling besar terdapat pada tegangan 15 kV, sedangkan gradient paling kecil terdapat pada tegangan 25 kV. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.3 bahwa semakin besar energi yang diberikan, maka tingkat kemiringan garis linier semakin landai.

4.6 Kurva Terompet Sinar X Energi Rendah

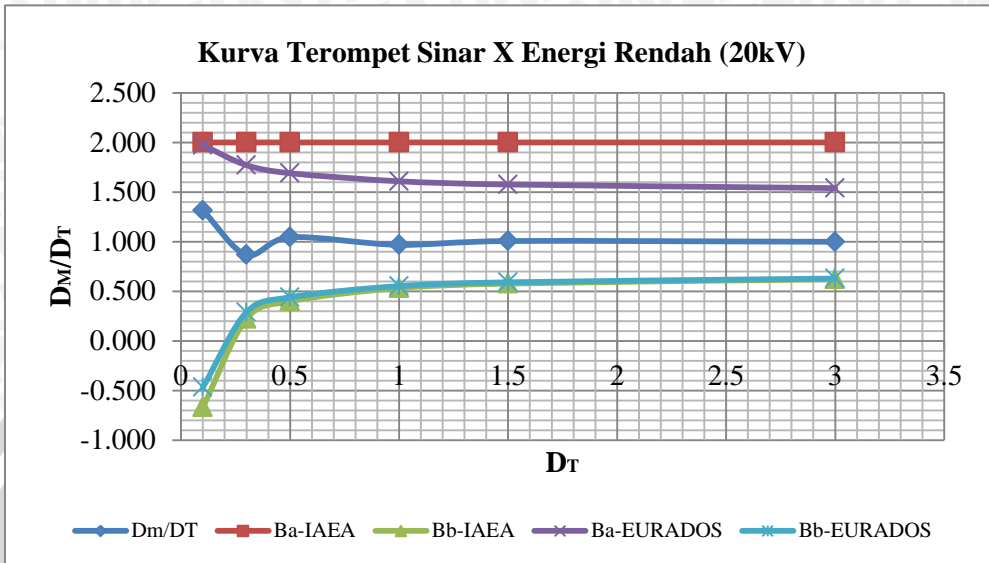
Kurva terompet merupakan kurva yang digunakan untuk mengevaluasi atau untuk menguji hasil dari kurva kalibrasi yang telah dibuat sebelumnya. Kurva terompet dibuat dengan menggunakan batas atas dan batas bawah dengan cara memasukkan ke dalam persamaan yang telah ditentukan oleh IAEA dan EURADOS. Batas atas merupakan batas toleransi maksimal dosis hasil pengukuran TLD dengan dosis sebenarnya yang diberikan ketika pengukuran. Sedangkan batas bawah merupakan batas toleransi minimal dosis hasil pengukuran TLD dengan dosis sebenarnya yang diberikan ketika penyinaran.

Hasil dari kurva terompet sinar X energi rendah pada tegangan 15 kV, 20 kV dan 25 kV dapat ditunjukkan pada Gambar 4.4, 4.5 dan Gambar 4.6. DM merupakan dosis hasil pengukuran TLD dari kurva kalibrasi, DT adalah dosis sebenarnya yang diberikan ketika

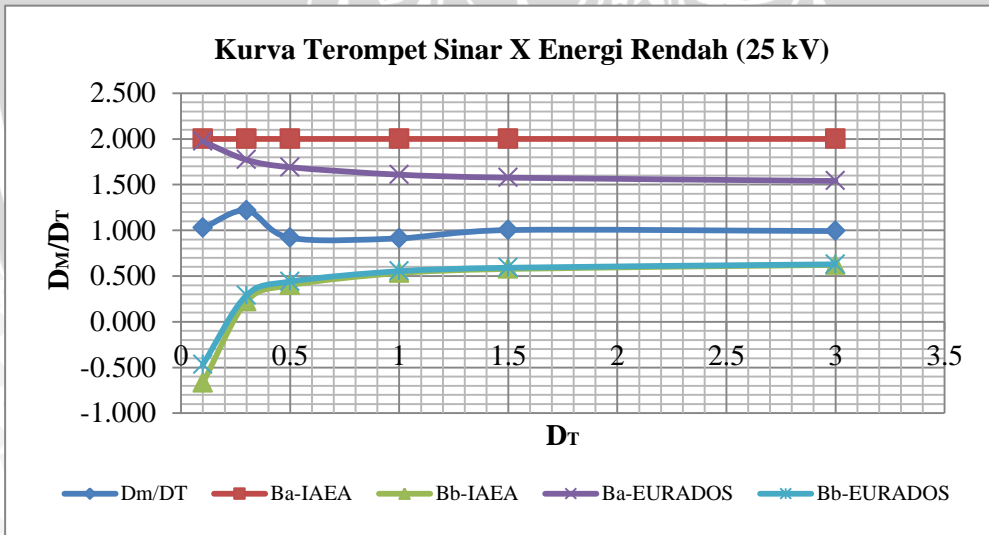
penyinaran, sedangkan Ba dan Bb merupakan batas atas dan bawah kurva terompet dari IAEA dan EURADOS.



Gambar 4.4 Kurva Terompet Sinar X Energi Rendah Pada Tegangan 15 kV



Gambar 4.5 Kurva terompet sinar X energi rendah pada tegangan 20 kV



Gambar 4.6 Kurva terompet sinar X energi rendah pada tegangan 25 kV

Dari Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 diatas, dapat diketahui bahwa terjadi perubahan fluktuasi dari garis D_M/D_T yang cukup signifikan pada dosis rendah dan garis menjadi semakin lurus dan konstan seiring dengan penambahan dosis yang diberikan. Kurva terompet memberikan rentang kesalahan yang bisa ditoleransi lebih besar untuk dosis rendah dari pada dosis tinggi yang cenderung konstan.

Perhitungan dan garis dari D_M/D_T masih berada dalam batas yang ditetapkan oleh IAEA dan EURADOS. Hal ini menunjukkan bahwa kurva kalibrasi sinar X energi rendah masih memenuhi standar internasional dari IAEA dan juga EURADOS dan juga kurva kalibrasi dapat dipakai sebagai kurva kalibrasi dosimeter perorangan.

4.7 Ketidakpastian Kurva Kalibrasi

Hasil ketidakpastian kurva kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 4.4, Tabel 4.5, dan Tabel 4.6. Ketidakpastian didapatkan dari perhitungan *confidence level* 95% yang mempertimbangkan variasi dari tanggapan TLD, ketidakpastian resolusi, ketidakpastian iradiasi, ketidakpastian bias (S), BIAS, dan ketidakpastian *fading*.

Ketidakpastian tipe A (U_A) berasal dari pengukuran secara langsung. Yang termasuk ketidakpastian tipe A adalah ketidakpastian variasi keseragaman TLD, ketidakpastian simpangan hasil pengukuran dan ketidakpastian hamburan. Ketidakpastian tipe A dapat dikurangi dengan cara menambahkan jumlah pengukuran dan jumlah dosimeter perorangan TLD (Yulianti, dkk., 2004). Ketidakpastian tipe B (U_B) berasal dari pengukuran sebelumnya atau dari referensi. Yang termasuk ketidakpastian tipe B adalah ketidakpastian iradiasi TLD (U_{irr}), dan ketidakpastian *fading* (U_{fad}). Sedangkan ketidakpastian U_C merupakan ketidakpastian gabungan antara kombinasi U_A dan U_B . Ketidakpastian bentangan (U_{exp}) diperoleh dari perhitungan faktor cakupan dikalikan dengan derajat kebebasan (k) yang bernilai 2 dengan tingkat kepercayaan sebesar 95% sesuai dengan yang telah ditetapkan oleh ketetapan praktek internasional (KAN, 2003)

Tabel 4.4 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 15 kV

No.	Dosis (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
1.	0,1	19	6	26
2.	0,3	5	6	14
3.	0,5	6	5	9
4.	1	5	5	6
5.	1,5	4	5	6
6.	3	3	5	5
Rata-rata		7	5	11
U_{exp} Confidence Level 95% (%)				22

Tabel 4.5 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 20 kV

No.	Dosis (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
1.	0,1	14	6	17
2.	0,3	5	6	8
3.	0,5	6	5	8
4.	1	6	5	7
5.	1,5	8	5	9
6.	3	8	5	9
Rata-rata		8	5	10
U_{exp} Confidence Level 95% (%)				20

Tabel 4.6 Ketidakpastian kurva kalibrasi sinar X energi rendah pada tegangan 25 kV

No.	Dosis (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
1.	0,1	4	5	6
2.	0,3	2	5	8
3.	0,5	7	5	8
4.	1	5	5	7
5.	1,5	5	4	6
6.	3	5	4	6
Rata-rata		5	5	7
U_{exp} Confidence Level 95% (%)				14

Dari Tabel 4.4, 4.5 dan 4.6 diatas, didapatkan nilai ketidakpastian tipe B pada seluruh tegangan sinar X energi rendah sama yaitu dengan rata-rata sebesar 5%. Untuk ketidakpastian tipe A nilai rata-rata ketidakpastian terbesar terdapat pada sinar X energi rendah dengan tegangan 20 kV, yaitu sebesar 8%. Dan nilai rata-rata terkecil terdapat pada sinar X energi rendah dengan tegangan 25 kV, yaitu sebesar 5%. Sedangkan untuk ketidakpastian gabungan U_{exp} dengan tingkat kepercayaan 95% terbesar terdapat pada sinar X energi rendah dengan tegangan 15 kV yaitu sebesar 22% dan nilai ketidakpastian U_{exp} dengan tingkat kepercayaan terkecil terdapat pada sinar X energi rendah dengan tegangan 25 kV yaitu sebesar 14%.. Menurut IAEA (1999), ketidakpastian gabungan untuk TLD pada dosis Hp(0,07) dan Hp(10) dengan tingkat kepercayaan 95% adalah sebesar 42%. Dengan demikian, maka dapat dikatakan bahwa hasil ketidakpastian yang diperoleh dari penelitian ini masih dalam batas toleransi yang diberikan oleh IAEA yaitu masih berada dibawah nilai 42% dan dapat dikatakan bahwa kurva kalibrasi yang didapatkan dari penelitian ini dapat digunakan untuk proses evaluasi dosis terhadap radiasi sinar X energi rendah. Data dengan nilai

ketidakpastian terbaik didapatkan pada sinar X energi rendah dengan tegangan 25 kV atau energi 20,4 keV.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Kurva kalibrasi memiliki sensitivitas terhadap respon yang berbeda-beda antara masing-masing tegangan dan dosis yang diberikan. Sensitivitas respon yang paling baik dengan rentang respon paling besar daripada tegangan yang lain didapatkan pada tegangan 25 kV. Kurva kalibrasi dari TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ menghasilkan kemiringan garis linier yang berbeda-beda bergantung energi yang dipancarkan dengan gradient antara 0,0046 sampai 0,0146. Kurva kalibrasi yang diperoleh dalam penelitian ini dapat digunakan untuk proses evaluasi dosis terhadap radiasi sinar X energi rendah.
2. Ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter perorangan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ buatan BARC dengan tingkat kepercayaan 95% adalah berkisar antara 14%-22%. Dengan ketidakpastian paling baik yaitu pada tegangan 25 kV.

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah penelitian kebergantungan TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dengan variasi sudut, agar diperoleh perbandingan fungsi sudut. Dan penelitian tanggapan dosimeter perorangan TLD dengan fantom jenis lain, agar diketahui pula perbandingan dari hasil pembacaan fantom dengan jenis lain yang digunakan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Adidrajat. (2013). *Cara Kerja Pesawat Sinar X*. Jakarta : Balai Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Ahmed, Syed Naeem. (2007). *Physics & Engineering of Radiation Detection*. London : Academic Press Inc.
- Alatas, Z., S. Hidayati dan dkk. (2002). *Buku Pintar Nuklir*. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Anonim. (n.d). *X-ray*. Retrieved April, 19, 2016 from <https://ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/xrays.htm>
- Arief, L. M. (2012). *Pengendalian Bahaya Radiasi Elektromagnetik Ditempat Kerja*. Jakarta : Fakultas Ilmu Kesehatan Masyarakat, Permintaan Keselamatan dan kesehatan Kerja Universitas Esa Unggul.
- BCM. (2007). *Penetration of Radiation*. Retrieved Maret, 16, 2016 from <http://www.bcm.edu/bodycomplab/Radprimer/radpenetration.htm>.
- BAPETEN. (2004). *Radiasi Non Pengion*. Retrieved Maret, 20, 2016 from http://ansn.bapeten.go.id/files/ins_Obyek_Inspeksi_FRZR.pdf.
- BATAN. (2008). *Pengenalan Radiasi*. Retrieved April, 21, 2016 from http://www.batan.go.id/pusdiklat/elearning/proteksiradiasi/pengenalan_radiasi/1-1.htm.
- BAPETEN. (2009). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2009 Tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Zat Radioaktif dan Pesawat Sinar-X Untuk Peralatan Gauging*. Jakarta : Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- BAPETEN. (2013). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. <http://.batan.go.id>.

- Cember, H. dan T. E. Johnson. (2009). *Introduction to Health Physics*. USA : McGraw-Hill Companies, Inc.
- Dam, J. V. dan Morenello, G. (2006). *Methods for in vivo dosimetry in external ed*. Brussels : ESTRO.
- Gabriel, J. F. (1996). *Fisika Kedokteran*. Denpasar : Departemen Fisika Universitas Udayana, Denpasar-Bali.
- Halliday, D dan R. Resnick. (1999). *Fisika Modern Edisi Ketiga*. Jakarta: Erlangga.
- Hiswara, E. (1994). *Istilah dan Definisi Dalam Proteksi Radiasi*. Jakarta : Badan Tenaga Nuklir Nasional, Pusat Standarisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi.
- Hurst, G. S. dan J. E. Turner. (1970). *Elementary Radiation Physics*. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- IAEA. (1996). *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115*. Vienna : International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2000). *Safety Report Series No. 16 Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments*. Vienna : International Atomic Energy Agency.
- ICRP. (1991). *1990 Recommendations Of The ICRP*. ICRP Publication 60. Oxford : International Commission On Radiological Protection.
- ICRU. (1998). *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation Report 60*. USA : International Commission on Radiation Units And Measurements.
- ISO. (2004). *X and Gamma Reference Radiation For Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and For Determining Their Response As A Function of Photon Energy-Part 4 : Calibration Of Area and Personel Dosemeters In Low Energy X Reference Radiation Fields on ISO 4037-4: 2004*. Vienna : International.
- Justus, B. L. dan M. A. Miller. (1999). *Measurement Instrumentation Sensors*. In J. G. Webster (Ed.). Boca Raton : CRC Press LLC.
- KAN, (2003). *Pedoman Evaluasi dan Pelaporan Ketidakpastian Pengukuran*. Jakarta: Komite Akreditasi Nasional.

- Khain, F. M. (2003). *The Physics of Radiation Therapy*. (J. Pine, Ed.) (3rd ed.). Philadelphia: LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- Kusumawati, D. D., Mukhlis A., Yulianti H. (2004). *Kondisi Tidak Ideal Dalam Pemakaian Dosimeter Perorangan Di Lapangan*. Buletin ALARA. Jakarta : PTKMR BATAN. 6: 9-17.
- Mauricio C. L. P., Jose M. J., Karla C. S. P. (2007). *Internal Quality Control Program for Individual Monitoring Service*. ISBN: 978-85-99141-02-1.
- McKinlay, A. F. (1981). *Thermoluminescence dosimetry-Medical Physics Handbooks*, Bristol: Adam Hilger Ltd.
- NCRD. (1997). *Dosimetry of Low and Medium Energy X-rays*. Netherlands.
- Nazaroh, Sri S. L., Nina. H., Rofiq S. (2013). *The Performance Assessment of TLD Barc System's Ptkmr-Batan to Support Radiation Protection Programme in Indonesia*. Buletin Alara.
- Oberhofer, M. dan Scharmann. (1992). *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Pradhan, A. S., M. M. Adtani, G. Varadharajan, A. K. Bakshi, K. Srivastawa dan R. R. Bihari. (2002). *Handbook On The Use Of TLD Badge Based On CaSO₄:Dy Teflon TLD Discs For Individual Monitoring*. Mumbai: Bhabha Atomic Reseach Center.
- PP. (2000). *Peraturan Pemerintah No. 63 Tahun 2000 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif, Pasal 10 Ayat 1*. Jakarta.
- Raad, J. A. dan A. Kuiper. (2007). *Industrial Radiography Image Forming Techniques*. Netherlands: General Electric Company.
- Saadati, A. (2015). *Pengujian Kurva Kalibrasi Neutron Dosimeter Perorangan TLD Harshaw Pada Radiasi Campuran Neutron dan Gamma*. Skripsi. Malang. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya.
- Smallman, R. E. dan R. J. Bishop. (2000). *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Jakarta : Erlangga.

- Sofyan, H. (2012). *Dosimeter Thermoluminesensi sebagai Dosimeter Personal Dalam Pemantauan Radiasi Eksternal*. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI (hlm 129 – 133). Purworejo. 14 April 2012.
- Sugiratu, A. B. (2012). *Analisis Dosis Radiasi Untuk Aplikasi Ruang ICU*. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
- Sunarya. (2014). *Dosimetri*. Jakarta : Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Svvaaha, A. (2010). *Personnel TLD Monitors, Their Calibration And Response*. Surrey: Department Of Physics Faculty Of Engineering And Physical Sciences University Of Surrey.
- Syaifudin, R., Nina H., dan Bambang S. (2006). *Dosimeter CaSO₄:Dy Buatan BARC Sebagai Pemantau Dosis Radiasi Perorangan Hp(10)*. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Fungsional Teknis Non Peneliti. ISSN: 1410-5381. 19 Desember 2006.
- Verdianto, A. (2012). *Peningkatan Akurasi Proses Pembacaan Detektor TL Pada TLD Reader Harshaw Model 3500*. Skripsi. Depok. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Wibowo, W. E. (2008). *Perbandingan Dosis Literatur*. Retrieved September 20, 2014, from [http://lib.ui.ac.id/File?File=Digital/125536-Fis.036-08-Perbandingan dosis-Literatur.Pdf](http://lib.ui.ac.id/File?File=Digital/125536-Fis.036-08-Perbandingan%20dosis-Literatur.Pdf).
- Winata, D. O. (2011). *Koefisien Backscatter Factor Sinar X Diagnostik Dalam Rentang RQR (Radiation Qualities In Radiodiagnostic) Pada ISO Water Slab Phantom*. Skripsi. Depok. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Wisnu, S. (1988). *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisa Pengaktifan Neutron*, Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Yuliati, H. dan A. Mukhlis. (2004). Faktor-Faktor Koreksi dalam Evaluasi Dosis Perorangan Dengan Dosimeter Thermoluminesensi. *Buletin Alara*. Vol 5 No 2 & 3. hlm 69-78, April 2004.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Gambar Alat dan Bahan Penelitian



Detektor Ionization Chamber 600cc Model/No. Seri NE 2575C/576



Elektrometer PTW UNIDOS Webline Model/No. Seri T 10022/00268



Elektrometer Farmer Dosemeter Model/No. Seri NE 2570/1B/1319



Filter Aluminium Pesawat Sinar X



Kolimotor B4-40 (belakang)



Kolimotor B3-80 (depan)



**Barometer, Hygrometer,
dan Termometer**



Laser



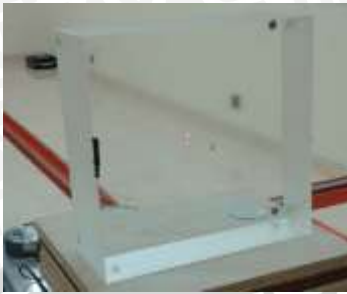
**1 set komputer dan TLD *Badge Reader* TL 1010
Nucleonix**



Tabung Nitrogen



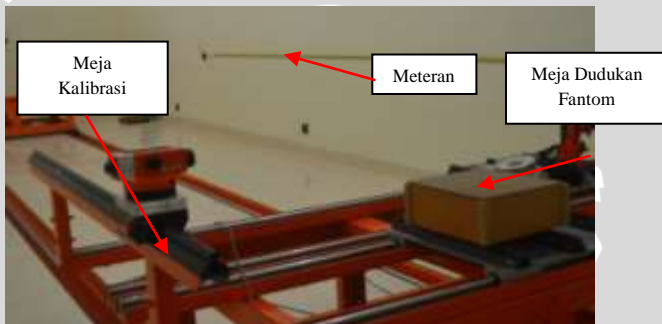
Oven Annealing



Fantom Solid Water
PMMA ukuran 30 x 30 x 15
cm³



Sumber Radioaktif
Sr-90



Meja Kalibrasi, Meja Dudukan Fantom dan Meteran



Sumber Radioaktif Cs-137



TLD CaSO₄:Dy Buatan
BARC dengan holder



Pesawat Sinar X dan Mesin Kontrol Pesawat Sinar X YXLON MGC 41



Alat Penunjang (Selotip, Gunting, Kertas, Pulpen)

Lampiran 2. Pengukuran Kerma Udara Pesawat Sinar X

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA
Energi : 12,7 keV

A. Pengecekan cacah latar belakang / kebocoran arus sebelum pengukuran

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (pC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rerata (nC/menit)
101,0	21,97	77%	5,00	1,00996	5,04980	0,00525
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,00	1,00996	5,04980	
101,0	21,97	77%	5,00	1,00996	5,04980	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	
101,0	21,97	77%	5,50	1,00996	5,55478	

B. Pengukuran dengan Timer pada Pesawat Sinar X

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (nC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rata" (nC/menit)	kerma (Gy/menit)
101,0	21,97	78%	-5,544	1,00996	5,59922	5,60245	0,00026
101,0	21,97	78%	-5,524	1,00996	5,57902		
101,0	21,97	78%	-5,625	1,00996	5,68102		
101,0	21,97	78%	-5,527	1,00996	5,58205		
101,0	21,97	78%	-5,516	1,00996	5,57094		
101,0	21,97	78%	-5,529	1,00996	5,58407		
101,0	21,97	78%	-5,527	1,00996	5,58205		
101,0	21,97	78%	-5,512	1,00996	5,56690		
101,0	21,97	78%	-5,511	1,00996	5,56589		
101,0	21,97	78%	-5,513	1,00996	5,56791		

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 20 kV / 5 mA
- Energi : 16,5 keV

A. Pengecekan cacah latar belakang / kebocoran arus sebelum pengukuran

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (pC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rerata (nC/menit)
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	0,00175
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	

B. Pengukuran dengan Timer pada Pesawat Sinar X

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (nC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rata" (nC/menit)	kerma (Gy/menit)
101,1	19,77	55%	-9,494	1,001439	9,50766	9,47702	0,00045
101,1	19,77	55%	-9,482	1,001439	9,49565		
101,1	19,77	55%	-9,489	1,001439	9,50266		
101,1	19,77	55%	-9,462	1,001439	9,47562		
101,1	19,77	55%	-9,462	1,001439	9,47562		
101,1	19,77	55%	-9,459	1,001439	9,47261		
101,1	19,77	55%	-9,460	1,001439	9,47361		
101,1	19,77	55%	-9,450	1,001439	9,46360		
101,1	19,77	55%	-9,448	1,001439	9,46160		
101,1	19,77	55%	-9,428	1,001439	9,44157		

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA
Energi : 20,4 keV

A. Pengecekan cacah latar belakang / kebocoran arus sebelum pengukuran

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (pC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rerata (nC/menit)
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	0,00175
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	2,0	1,001473	2,00295	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	
101,1	19,78	54%	1,5	1,001473	1,50221	

B. Pengukuran dengan Timer pada Pesawat Sinar X

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (nC/menit)	K _{PT}	M x K _{PT}	M rata" (nC/menit)	kerma (Gy/menit)
101,1	19,77	55%	-9,494	1,001439	9,50766	9,47702	0,00045
101,1	19,77	55%	-9,482	1,001439	9,49565		
101,1	19,77	55%	-9,489	1,001439	9,50266		
101,1	19,77	55%	-9,462	1,001439	9,47562		
101,1	19,77	55%	-9,462	1,001439	9,47562		
101,1	19,77	55%	-9,459	1,001439	9,47261		
101,1	19,77	55%	-9,460	1,001439	9,47361		
101,1	19,77	55%	-9,450	1,001439	9,46360		
101,1	19,77	55%	-9,448	1,001439	9,46160		
101,1	19,77	55%	-9,428	1,001439	9,44157		

Lampiran 3. Perhitungan Hp (10) dan K_u

M _{netto}	: M _{rerata} - M _{bg}
K _u (Kerma Udara)	: M _{netto} x Nk
Hp (10)	: K _u x Faktor Konversi
Faktor Konversi Hp (10) untuk 15 kV	: 0,06 Sv.Gy ⁻¹
Faktor Konversi Hp (10) untuk 20 kV	: 0,27 Sv.Gy ⁻¹
Faktor Konversi Hp (10) untuk 25 kV	: 0,55 Sv.Gy ⁻¹
Nk untuk Energi 12,7 keV (15 kV)	: 47,20 μGy/nC
Nk untuk Energi 16,5 keV (20 kV)	: 46,20 μGy/nC
Nk untuk Energi 20,4 keV (25 kV)	: 45,20 μGy/nC

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA
- Energi : 12,7 keV

SDD (cm)	M _{rerata} (pC/menit)	M _{bg} (pC/menit)	M _{netto} (pC/menit)	K _s (.....)	K _{pol} (.....)	N _k (μGy/nC)	K _u (μGy/menit)	Hp (10) (μSv/menit)
200	5,60245	0,00525	5,5972	1	1	47,20	264,188	15,85126

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 20 kV / 5 mA
 Energi : 16,5 keV

SDD (cm)	M _{rerata} (pC/menit)	M _{bg} (pC/menit)	M _{netto} (pC/menit)	K _s (.....)	K _{pol} (.....)	N _k (μGy/nC)	K _u (μGy/menit)	Hp (10) (μSv/menit)
200	9,47701965	0,0017526	9,4752671	1	1	46,20	437,75734	118,194481

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA
 Energi : 20,4 keV

SDD (cm)	M _{rerata} (pC/menit)	M _{bg} (pC/menit)	M _{netto} (pC/menit)	K _s (.....)	K _{pol} (.....)	N _k (μGy/nC)	K _u (μGy/menit)	Hp (10) (μSv/menit)
200	6,6180109	0,0038039	6,614207	1	1	45,20	298,96216	164,429186

Lampiran 4. Perhitungan Waktu Penyinaran

Waktu Penyinaran : Dosis yang diinginkan / Hp (10)
 Hp(10) untuk 15 kV : 15,85126 μ Sv/menit
 Hp(10) untuk 20 kV : 118,194481 μ Sv/menit
 Hp(10) untuk 25 kV : 164,429186 μ Sv/menit

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA
 Energi : 12,7 keV

SDD (cm)	Dosis (mSv)					
	0,1	0,3	0,5	1	1,5	3
200	6 menit 19 menit	18 menit 56 detik	31 menit 33 detik	63 menit 5 detik	94 menit 38 detik	189 menit 16 detik

Tegangan (HV) / Arus (I) : 20 kV / 5 mA

Energi : 16,5 keV

SDD (cm)	Dosis (mSv)					
	0,1	0,3	0,5	1	1,5	3
200	51 detik	2 menit 32 detik	4 menit 14 detik	8 menit 28 detik	12 menit 42 detik	25 menit 23 detik

- Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA
Energi : 20,4 keV

SDD (cm)	Dosis (mSv)					
	0,1	0,3	0,5	1	1,5	3
200	37 detik	1 menit 50 detik	3 menit 3 detik	6 menit 5 detik	9 menit 7 detik	18 menit 15 detik

Lampiran 5. Data Pembacaan TLD

Kondisi Penyinaran

SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 15 kV
 Energi : 12,7 keV

Dosis yang diberikan	Bacaan TLD			Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
	D1	D2	D3				
0,1 mSv	60	3636	3294	6 menit 19 detik	100,6	19,93	50
	83	4387	4136				
	77	3601	3162				
	55	3927	3578				
0,3 mSv	101	24301	26355	19 menit	100,5	20,25	49
	88	23627	20154				
	102	26592	23874				
	90	28274	31187				
0,5 mSv	96	40253	36859	31 menit 40 detik	100,6	19,01	49
	109	46952	51172				
	124	48620	50065				
	111	49683	48756				
1 mSv	145	81430	76425	63 menit 10 detik	100,7	19,56	48
	145	80476	69118				
	167	84477	80737				
	140	83611	78014				
1,5 mSv	171	125108	107085	94 menit 40 detik	100,9	20,19	49
	192	126700	112258				
	200	150790	147856				
	181	144014	134593				
3 mSv	299	254103	213880	189 menit 20 detik	101,0	20,21	51
	261	273096	244725				
	281	264942	231783				
	294	259164	230787				

Kondisi Penyinaran

SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)

HV : 20 kV

Energi : 16,4 keV

Dosis yang diberikan	Bacaan TLD			Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
	D1	D2	D3				
0,1 mSv	60	3636	3294	51 detik	100,9	20,33	56
	83	4387	4136				
	77	3601	3162				
	55	3927	3578				
0,3 mSv	85	10321	9514	2 menit 32 detik	100,9	19,89	55
	77	12019	11720				
	89	10237	9716				
	76	10499	8650				
0,5 mSv	108	20162	18066	4 menit 14 detik	100,9	19,92	55
	114	20712	17955				
	118	20234	17523				
	93	17060	14055				
1 mSv	148	33699	28207	8 menit 28 detik	100,9	19,63	54
	169	33965	29181				
	162	33799	28052				
	134	33303	28316				
1,5 mSv	240	59623	54131	12 menit 50 detik	101,0	19,32	54
	171	59136	52703				
	206	54646	44049				
	215	53197	44701				
3 mSv	380	104739	87024	25 menit 30 detik	101,0	20,27	57
	305	108886	97706				
	427	100011	90100				
	321	103100	87847				

Kondisi Penyinaran

SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)

HV : 25 kV

Energi : 20,4 keV

Dosis yang diberikan	Bacaan TLD			Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
	D1	D2	D3				
0,1 mSv	112	2231	1848	37 detik	101,0	20,32	57
	119	2378	2139				
	128	2394	2219				
	127	2427	2166				
0,3 mSv	170	8063	7327	1 menit 50 detik	101,0	20,00	56
	178	7935	6841				
	183	7911	7172				
	183	8560	7055				
0,5 mSv	178	11142	9722	3 menit 3 detik	101,0	19,70	56
	232	12898	10886				
	200	10992	9142				
	186	11300	8707				
1 mSv	309	23045	17441	6 menit 5 detik	101,0	19,64	55
	279	26149	20967				
	272	23054	17570				
	330	22159	17513				
1,5 mSv	394	40230	32733	9 menit 7 detik	101,0	19,30	54
	427	33775	26936				
	481	39626	32839				
	403	34124	27056				
3 mSv	732	67331	53271	18 menit 20 detik	101,1	20,32	57
	771	66259	54143				
	649	67854	54615				
	833	68122	55114				

Lampiran 6. Perhitungan Ketidakpastian Kurva Kalibrasi

1. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 15 kV
 Energi : 12,7 keV

- **Ketidakpastian Tipe A (U_A)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{res} (%)	U_A (%)
0,1	70	1,42	19
0,3	72	1,38	5
0,5	87	1,15	6
1	126	0,79	5
1,5	163	0,61	4
3	261	0,38	3
Rata-rata			7

- **Ketidakpastian Tipe B (U_B)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{irr} (%)	U_{fad} (%)	U_{BG} (%)	U_B (%)
0,1	70	2	0,5	3	6
0,3	72	2	0,5	3	6
0,5	87	2	0,5	3	5
1	126	2	0,5	3	5
1,5	163	2	0,5	3	5
3	261	2	0,5	3	5
Rata-rata					5

- **Ketidakpastian Tipe C (U_C)**

D_T (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
0,1	19	6	26
0,3	5	6	14
0,5	6	5	9
1	5	5	6
1,5	4	5	6
3	3	5	5
Rata-rata	7	5	11
U_{exp} Confidence Level 95%			22

2. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 20 kV
 Energi : 16,5 keV

- **Ketidakpastian Tipe A (U_A)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{res} (%)	U_A (%)
0,1	46	2,19	14
0,3	59	1,70	5
0,5	85	1,17	6
1	130	0,77	6
1,5	185	0,54	8
3	335	0,30	8
Rata-rata			8

- **Ketidakpastian Tipe B (U_B)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{irr} (%)	U_{fad} (%)	U_{BG} (%)	U_B (%)
0,1	46	2	0,5	3	6
0,3	59	2	0,5	3	6
0,5	85	2	0,5	3	5
1	130	2	0,5	3	5
1,5	185	2	0,5	3	5
3	335	2	0,5	3	5
Rata-rata					5

- **Ketidakpastian Tipe C (U_C)**

D_T (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
0,1	14	6	17
0,3	5	6	8
0,5	6	5	8
1	6	5	7
1,5	8	5	9
3	8	5	9
Rata-rata	8	5	10
U_{exp} Confidence Level 95%			20

3. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 25kV
 Energi : 20,4 keV

• **Ketidakpastian Tipe A (U_A)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{res} (%)	U_A (%)
0,1	99	1,02	4
0,3	156	0,64	2
0,5	176	0,57	7
1	275	0,36	5
1,5	403	0,25	5
3	723	0,14	5
Rata-rata			5

• **Ketidakpastian Tipe B (U_B)**

D_T (mSv)	R (D1) (nC)	U_{irr} (%)	U_{fad} (%)	U_{BG} (%)	U_B (%)
0,1	99	2	0,5	3	6
0,3	156	2	0,5	3	6
0,5	176	2	0,5	3	5
1	275	2	0,5	3	5
1,5	403	2	0,5	3	5
3	723	2	0,5	3	5
Rata-rata					5

- Ketidakpastian Tipe C (U_C)

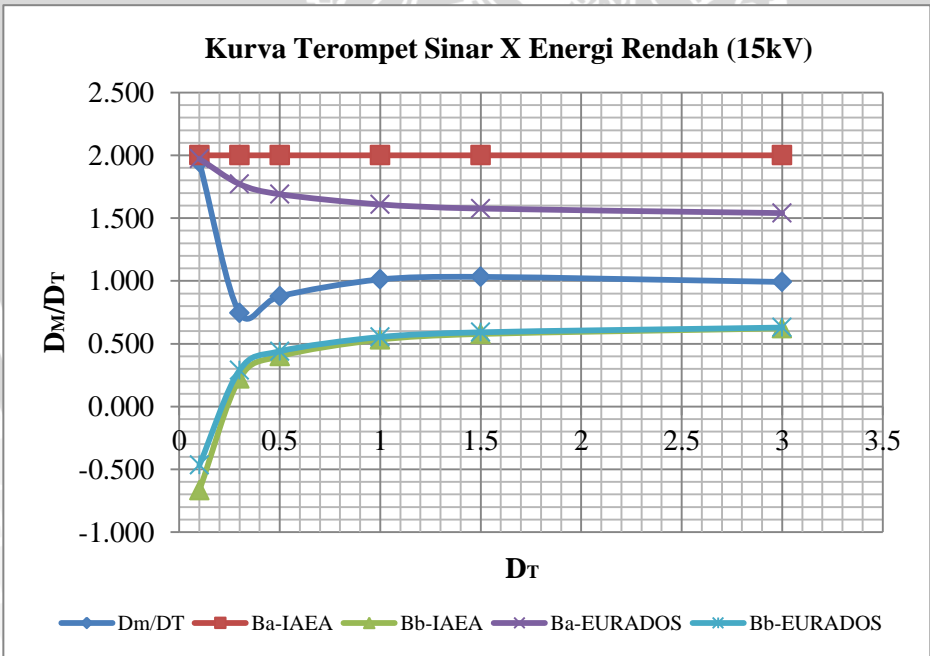
D_T (mSv)	U_A (%)	U_B (%)	U_C (%)
0,1	4	6	6
0,3	2	6	8
0,5	7	5	8
1	5	5	7
1,5	5	5	6
3	5	5	6
Rata-rata	5	5	7
U_{exp} Confidence Level 95%			14



Lampiran 7. Perhitungan Kurva Terompet

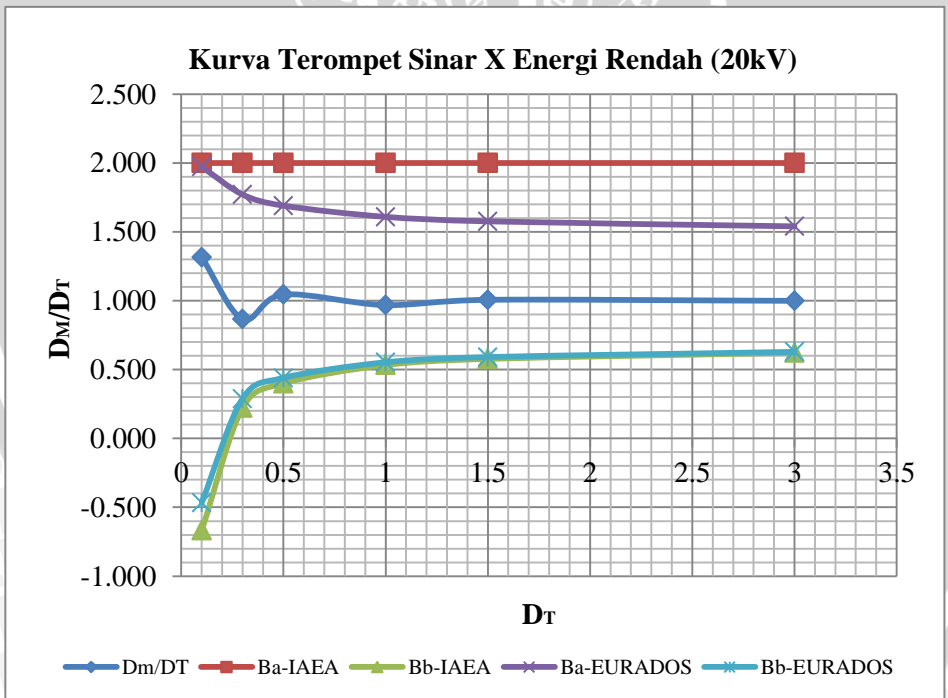
1. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 15 kV
 Energi : 12,7 keV

D_T (mSv)	R (D1)	D_m	D_m/D_T	EURADOS		IAEA	
				Bb	Ba	Bb	Ba
0,1	70	0,194	1,945	-0,5	2,0	-0,7	2
0,3	72	0,224	0,746	0,3	1,8	0,2	2
0,5	87	0,439	0,878	0,4	1,7	0,4	2
1	126	1,012	1,012	0,6	1,6	0,5	2
1,5	163	1,549	1,032	0,6	1,6	0,6	2
3	261	2,976	0,992	0,6	1,5	0,6	2



2. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 20 kV
 Energi : 16,5 keV

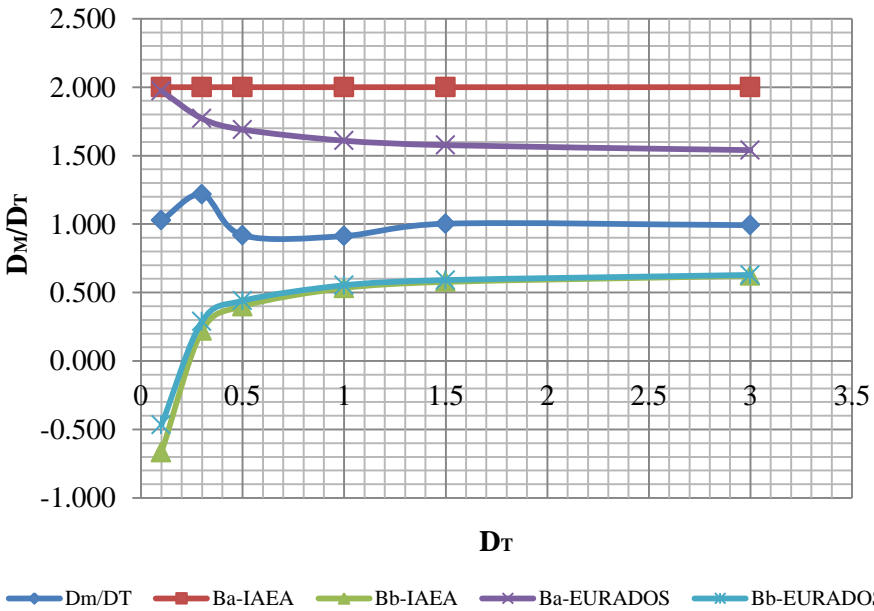
D_T (mSv)	R (D1)	D_m	D_m/D_T	EURADOS		IAEA	
				Bb	Ba	Bb	Ba
0,1	46	0,132	1,315	-0,5	2,0	-0,7	2
0,3	59	0,260	0,867	0,3	1,8	0,2	2
0,5	85	0,523	1,045	0,4	1,7	0,4	2
1	130	0,968	0,968	0,6	1,6	0,5	2
1,5	185	1,510	1,007	0,6	1,6	0,6	2
3	335	2,998	0,999	0,6	1,5	0,6	2



3. SDD : 200 cm (197,7 cm pada mistar)
 HV : 25 kV
 Energi : 20,4 keV

D_T (mSv)	R (D1)	D_m	D_m/D_T	EURADOS		IAEA	
				Bb	Ba	Bb	Ba
0,1	99	0,103	1,027	-0,5	2,0	-0,7	2
0,3	156	0,365	1,216	0,3	1,8	0,2	2
0,5	176	0,459	0,918	0,4	1,7	0,4	2
1	275	0,912	0,912	0,6	1,6	0,5	2
1,5	403	1,505	1,003	0,6	1,6	0,6	2
3	723	2,977	0,992	0,6	1,5	0,6	2

Kurva Terompet Sinar X Energi Rendah (25 kV)



Lampiran 8. Peta Kontrol Penyinaran Keseragaman

No.	Tanggapan TLD	Rata-rata	UWL	LWL	UAL	LAL
1.	17	23	29	16	33	12
2.	20	23	29	16	33	12
3.	24	23	29	16	33	12
4.	24	23	29	16	33	12
5.	21	23	29	16	33	12
6.	22	23	29	16	33	12
7.	23	23	29	16	33	12
8.	19	23	29	16	33	12
9.	22	23	29	16	33	12
10.	18	23	29	16	33	12
11.	27	23	29	16	33	12
12.	26	23	29	16	33	12
13.	25	23	29	16	33	12
14.	25	23	29	16	33	12
15.	27	23	29	16	33	12
16.	24	23	29	16	33	12
17.	21	23	29	16	33	12
18.	24	23	29	16	33	12
19.	24	23	29	16	33	12
20.	29	23	29	16	33	12
21.	29	23	29	16	33	12
22.	17	23	29	16	33	12
23.	20	23	29	16	33	12
24.	28	23	29	16	33	12
25.	29	23	29	16	33	12

No.	Tanggapan TLD	Rata-rata	UWL	LWL	UAL	LAL
26.	28	23	29	16	33	12
27.	29	23	29	16	33	12
28.	23	23	29	16	33	12
29.	21	23	29	16	33	12
30.	27	23	29	16	33	12
31.	24	23	29	16	33	12
32.	21	23	29	16	33	12
33.	22	23	29	16	33	12
34.	18	23	29	16	33	12
35.	18	23	29	16	33	12
36.	25	23	29	16	33	12
37.	18	23	29	16	33	12
38.	20	23	29	16	33	12
39.	24	23	29	16	33	12
40.	22	23	29	16	33	12
41.	18	23	29	16	33	12
42.	18	23	29	16	33	12
43.	18	23	29	16	33	12
44.	20	23	29	16	33	12
45.	25	23	29	16	33	12
46.	22	23	29	16	33	12
47.	24	23	29	16	33	12
48.	22	23	29	16	33	12
49.	25	23	29	16	33	12
50.	20	23	29	16	33	12
51.	21	23	29	16	33	12
52.	27	23	29	16	33	12