

**KALIBRASI DOSIMETER PERORANGAN TLD HARSHAW
TERHADAP SINAR-X ENERGI RENDAH**

SKRIPSI

oleh :

**Yeni Mulia Sari
125090307111007**



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

**KALIBRASI DOSIMETER PERORANGAN TLD HARSHAW
TERHADAP SINAR-X ENERGI RENDAH**

SKRIPSI

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

oleh :

**Yeni Mulia Sari
125090307111007**



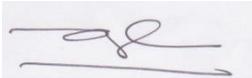
**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2016**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
KALIBRASI DOSIMETER PERORANGAN TLD HARSHAW
TERHADAP SINAR-X ENERGI RENDAH

Oleh :
YENI MULIA SARI
125090307111007

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

Pembimbing I



Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc
NIP. 19650111 199002 1 002

Pembimbing II



Dra. C. Tuti B., M.Si
NIP. 196011271986032004

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

Sukir Maryanto, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 19710621 199802 1 001

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yeni Mulia Sari
NIM : 125090307111007
Jurusan : Fisika
Skripsi Berjudul :

Kalibrasi Dosimeter Perorangan TLD Harshaw Terhadap 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, 2016
Yang menyatakan,

(Yeni Mulia Sari)
NIM. 125090307111007

KALIBRASI DOSIMETER PERORANGAN TLD HARSHAW TERHADAP SINAR-X ENERGI RENDAH

ABSTRAK

Sinar-X energi rendah banyak digunakan secara luas dalam bidang teknologi dan industri untuk mengukur ketebalan bahan. Namun, penggunaan sinar-X dapat menimbulkan beberapa resiko terkait dengan dosis radiasi yang diterima pekerja. Oleh karena itu, perlu dilakukan proteksi radiasi untuk memantau dosis yang diterima oleh pekerja agar tidak melebihi nilai batas dosis yang sudah ditetapkan oleh Bapeten. Salah satu upaya proteksi radiasi adalah penggunaan dosimeter TLD-700 Harshaw. Kalibrasi TLD Harshaw memanfaatkan fantom sebagai media untuk meletakkan TLD yang disinari oleh sinar-X dengan energi sebesar 12,7 keV, 16,5 keV dan 20,4 keV serta variasi dosis sebesar (0,1, 0,5, 1, 1,5, 3) mSv. Paparan radiasi yang diterima TLD dibaca oleh Harshaw *Reader* dan digunakan untuk menentukan kurva kalibrasi pada masing-masing energi. Pengujian kurva kalibrasi dapat dilakukan dengan mengacu pada kurva terompet. Kurva terompet dibuat berdasarkan batas maksimal dan batas minimal IAEA dan Eurados. Kurva kalibrasi dikatakan baik bila berada pada daerah antara IAEA dan Eurados yang dapat digunakan sebagai acuan dosis yang diterima oleh para pekerja radiasi.

Kata kunci : Kalibrasi TLD Harshaw, Sinar-X, Harshaw *reader*, Kurva kalibrasi, Kurva terompet

INDIVIDUAL CALIBRATION DOSIMETER TLD HARSHAW AGAINST LOW ENERGY X-RAY

ABSTRACT

Low energy X-rays are used widely in the fields of technology and industry to measure the thickness of material. However, X-rays may pose risks related to the dose of radiation received by workers. Therefore, it is necessary to monitor the dose received by worker in order to fulfill the regulation dose limit value by Bapeten. One of the efforts to monitor the dose of radiation is to measure it by using TLD-700 dosimeter Harshaw. Harshaw TLD calibration utilize phantom as a medium to put TLD illuminated by X-rays with an energy of 12,7 keV, 16,5 keV and 20,4 keV and a variety of doses (0,1, 0,5, 1, 1,5, 3) mSv. Radiation received by TLD is readed by Harshaw reader and used to determine the calibration curve for each energy. The calibration curve can be tested by using the trumpet curve. Trumpet curve created based on the maximum and minimum limit of IAEA and Eurados. The calibration curve is said to be satisfied if it locates within the area between IAEA and Eurados and can be used as a reference to determine the doses of radiation received by workers.

Keyword : Harshaw Calibration TLD, X-rays, Harshaw reader, a calibration curve, trumpet curve

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kalibrasi Dosimeter Perorangan TLD Harshaw Terhadap Sinar-X Energi Rendah” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya.

Dengan selesainya skripsi ini, tidak terlepas dari bantuan banyak pihak sehingga pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Ibu dan bapak yang selalu memberikan doa dan mensupport baik moril maupun materil. Serta saudara penulis Mardiana dan Kokoh Prasetyo yang selalu memberikan saran terbaik dalam penyusunan skripsi ini.
2. Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc selaku dosen pembimbing pertama yang memberikan motivasi dan bimbingannya.
3. Dra. C. Tuti Budiantari, M.Si selaku dosen pembimbing kedua yang bersedia menyediakan waktu untuk pengambilan data dalam penulisan skripsi dan mengarahkan dalam penyusunan skripsi.
4. Drs. Bunawas Satimin serta seluruh staf di BATAN yang tidak henti-hentinya memberikan pengarahan dan dukungan kepada penulis.
5. Keluarga Rinaldi yang memberikan fasilitas kepada penulis selama berada di Jakarta.
6. Rekan-rekan penulis selama di Jakarta : Ayu, Atika, Weni, Pram, Mbak Firli, Mbak Aisyah, Mbak Nia, Mas Helmy serta trio UGM : Dede, Afi, dan Aliza yang memberikan semangat dan doa untuk kelancaran skripsi ini.
7. Kru Bukopers : Adina, Rizka, Nila, Cynthia, Nikzha, Hani dan Ayesha yang selalu menghibur dan memberikan semangat kepada penulis.

8. Siska dan Alfin serta teman-teman penulis yang lain. Terima kasih atas semua semangat dan doa kalian.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak lepas dari kekurangan, karena itu kritik dan saran sangat penulis harapkan, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi yang membacanya.

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
LEMBAR PERNYATAAN	vii
ABSTRAK.....	ix
INDIVIDUAL CALIBRATION DOSIMETER TLD HARSHAW AGAINST LOW ENERGY X-RAY	xi
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
Penulis	xiv
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat.....	3
(halaman ini sengaja dikosongkan)	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Radiasi	5
2.1.1 Radiasi Pengion	5
2.1.2 Radiasi Non Pengion	6

2.2 Dosis ekivalen personal	6
2.3 Dosis Radiasi	7
2.3.1 Dosis Serap (D).....	7
2.3.2 Dosis Ekivalen (H_T)	8
2.3.3 Dosis Efektif ($E\tau$)	9
2.4 Kerma.....	10
2.5 Kolimator Pesawat Sinar-X	11
2.6 Kualitas Berkas Sinar Radiasi (HVL).....	12
2.7 Karakteristik Material TLD	13
2.8 <i>Fading</i> (Pemudaran)	15
2.9 Prinsip Kerja Thermoluminence Dosimeter	16
2.10 Pembacaan Dosimeter TLD Menggunakan TLD Harshaw Reader.....	17
2.11 Water Solid Fantom PMMA	18
2.12 Sinar-X.....	19
2.13 Interaksi Sinar-X.....	21
2.13.1 Efek fotolistrik	21
2.13.2 Efek Compton	22
2.13.3 Produksi Pasangan	22
2.14 Proses terjadinya Sinar-X	24
2.15 Proteksi Radiasi	25
BAB III	29
METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	29
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.2.1 Alat.....	29
3.2.2 Bahan	30
3.3 Tahap Penelitian.....	30

3.3.1 Persiapan.....	31
BAB IV	41
HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Uji Keseragaman TLD Harshaw	41
4.2 Perhitungan Kerma	42
4.3 Kurva Kalibrasi.....	44
4.4 Distribusi Radiasi Sinar-X Terhadap Dosimeter TLD....	47
4.5 Kurva Terompet.....	50
(halaman ini sengaja dikosongkan)	54
BAB V	55
PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran	55
(halaman ini sengaja dikosongkan)	56
DAFTAR PUSTAKA	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Daya tembus radiasi pengion pada materi	6
Gambar 2.2 Kolimator pesawat sinar-X	12
Gambar 2.3 Hubungan antara koefisien atenuasi dan hvl untuk aluminium	13
Gambar 2.4 Dosimeter standar TLD Harshaw	15
Gambar 2.5 Harshaw TLD <i>card</i> tipe 7776 dan holder tipe 881415	
Gambar 2.6 Proses terjadinya peristiwa termoluminesensi pada TLD.....	17
Gambar 2.7 Skema proses TLD <i>Reader</i> Harshaw untuk mendeteksi radiasi yang terpapar pada TLD	18
Gambar 2.8 Water solid fantom PMMA untuk kalibrasi personal dosimeter (IAEA, 2000).....	19
Gambar 2.9 Transisi eksitasi dari sinar-X.....	20
Gambar 2.10 Skema tabung sinar-X yang dilengkapi dengan dua elektroda, yaitu: anoda dan katoda.....	20
Gambar 2.11 Skema efek fotolistrik pada atom	21
Gambar 2.12 Hamburan Compton: tabrakan elastis antara foton dan elektron	22
Gambar 2.13 Skema representasi produksi pasangan.....	23
Gambar 2.14 Interaksi foton dengan bahan yang terdiri dari: Efek fotolistrik, Compton, dan produksi pasangan	23
Gambar 2.15 Proses terjadinya sinar-X <i>bremstrahlung</i>	24
Gambar 2.16 Proses terjadinya sinar-x karakteristik	25
Gambar 3.1 Penyinaran keseragaman TLD Harshaw dengan model fisis berupa water solid fantom PMMA.....	32
Gambar 3.2 Penggunaan elektrometer dan kontrol panel pesawat sinar-X di ruang kontrol.....	34
Gambar 3.3 Penentuan kerma menggunakan detektor di ruang penyinaran sinar-X.	34

Gambar 3.4 Penyinaran TLD pada fantom dengan sumber radiasi pesawat sinar-X.....	35
Gambar 4.1 Keseragaman TLD Harshaw menggunakan sumber radioaktif Cs-137.	41
Gambar 4.3 Kurva kalibrasi TLD Harshaw pada energi 16,5 keV dengan variasi dosis.....	45
Gambar 4.4 Kurva kalibrasi TLD Harshaw pada energi 20,4 keV dengan variasi dosis.....	45
Gambar 4.5 Peletakkan TLD Harshaw pada permukaan depan fantom.....	47
Gambar 4.6 Kurva terompet pada energi 12,7 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.	50
Gambar 4.7 Kurva terompet pada energi 16,5 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.	51
Gambar 4.8 Kurva terompet pada energi 20,4 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.	51
Gambar 4.9 Ketidakpastian gabungan (U_c) dan ketidakpastian bentangan (U_{exp}) kurva kalibrasi.	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai faktor bobot berbagai jenis radiasi (NCRP, 1993).	9
Tabel 2.2 Nilai faktor bobot berbagai organ tubuh (NCRP, 1993).....	10
Tabel 3.1 Faktor kalibrasi detektor ionisasi tipe NE 2575C volume 600cc.....	33
Tabel 3.2 Faktor konversi pada dosis ekivalen kedalaman Hp(10).....	33
Tabel 4.1 Pengukuran kerma pada tegangan 15 kV.....	43
Tabel 4.2 Pengukuran kerma pada tegangan 20 kV.....	43
Tabel 4.3 Pengukuran Kerma Pada Tegangan 25 kV.....	44
Tabel 4.4 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 3 mSv.....	48
Tabel 4.5 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 1,5 mSv.....	48
Tabel 4.6 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 1 mSv.....	48
Tabel 4.7 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 0,5 mSv.....	49
Tabel 4.8 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 0,1 mSv.....	49

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Gambar Alat dan Bahan Penelitian	61
Lampiran 2 : Pengukuran Kerma Udara Pesawat Sinar-X	64
Lampiran 3 : Perhitungan Hp(10) dan Ku	67
Lampiran 4 : Waktu Penyinaran	68
Lampiran 5 : Data Pembacaan TLD	69
Lampiran 6 : Perhitungan Ketidakpastian Kurva Kalibrasi.	74
Lampiran 7: Penyinaran Keseragaman	77
Lampiran 8: Perhitungan Kurva Terompet	78

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Radiasi adalah energi dalam bentuk gelombang atau partikel, dimana perambatan radiasi tidak memerlukan medium atau bahan penghantar lainnya. Penggunaan radiasi yang tidak terkontrol dapat membawa resiko potensial terhadap kesehatan dan keselamatan pekerja. Terdapat dua bentuk radiasi yaitu radiasi pengion dan non pengion. Salah satu contoh radiasi pengion adalah radiasi Sinar-X (CNSC, 2012).

Sinar-X adalah radiasi elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dengan rentang antara 0.1-100 Å dan dihasilkan oleh sumber radiasi yang berasal dari tabung sinar-x dilengkapi dengan filamen pemanas (Tungsten) sebagai katoda, melalui filamen (emisi cahaya) elektron yang dipancarkan menjadi dipercepat dalam medan listrik yang tinggi terhadap anoda (target) (Arezki, 2016). Penggunaan radiasi sinar-X banyak digunakan di bidang teknologi dan industri, dari penggunaan radiasi tersebut dapat memicu resiko. Upaya untuk mengurangi potensi bahaya radiasi adalah dengan digunakannya sinar-X energi rendah, penggunaan sinar-X energi rendah dapat meminimalisir dosis yang diterima pekerja radiasi. Berdasarkan ISO 4037, sinar-X dikategorikan menjadi sinar-X energi rendah, sedang dan tinggi. Sinar-X energi rendah berkisar pada tegangan 10 kV-30 kV.

Proteksi keselamatan radiasi diatur sesuai dengan Peraturan Pemerintah (PP) No. 63 Tahun 2000 yang menyatakan bahwa setiap pekerja radiasi harus menggunakan alat untuk pemantauan dosis perorangan. Dosimeter perorangan yang digunakan pada penelitian ini adalah Termoluminesensi Dosimeter (TLD) dengan material penyusun *Lithium Fluorida* (LiF) dan didopping dengan magnesium dan titanium (LiF: Mg,Ti) yang digunakan untuk pemantauan pribadi pekerja yang terpapar radiasi, pemantauan bagi pekerja sangat penting dalam rangka untuk memastikan bahwa batas dosis ekivalen tidak melebihi dosis maksimum yang diizinkan (Arezki, 2016). TLD LiF: Mg, Ti sering digunakan karena jangkauan dosis yang dimiliki luas, tanggapan energi yang dimiliki baik, dan stabilitas material

bagus (Winata, 2011). TLD LiF:Mg, Ti memiliki karakteristik bahan yang hampir sama dengan jaringan tubuh manusia (nomor atom efektif jaringan, $Z_{\text{eff}} = 7,4$) (Kusumawati dan Hasnel, 2012). TLD memiliki holder model 8814 dan untuk mengetahui hasil tanggapan TLD setelah dilakukan penyinaran dapat dibaca dengan menggunakan TLD Harshaw *reader* model 6600 (Wohni, 2002).

Penelitian sinar-X energi rendah menggunakan dosimeter ekuivalen perorangan Hp(10), Hp(10) menyatakan kedalaman 10 mm di bawah permukaan kulit. Penggunaan Hp(10) karena mewakili dosis yang diterima seluruh tubuh (*whole body*) dengan daya tembus yang dimiliki adalah daya tembus kuat.

Alat ukur radiasi perlu dikalibrasi untuk pemantauan proteksi radiasi dan respon energi yang didapat harus sesuai dengan respon energi yang digunakan berdasarkan Peraturan Kepala (PERKA) BAPETEN Nomor 6 Tahun 2009 yang menyatakan bahwa: tabung sinar-X harus sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau standar yang dikeluarkan dari pabrikan atau laboratorium dari negara asal, digunakan filter, dilengkapi dengan sistem pendukung yaitu kontrol panel. Kontrol panel pada pesawat sinar-X dilengkapi dengan adanya label petunjuk bahaya radiasi, saklar kunci, tombol pengatur waktu, saklar *on/off* beserta indikator petunjuk kuat arus dan tegangan. Sebelum pengoperasian pesawat sinar-X perlu dilakukan seting parameter untuk mendapatkan sinar-X yang dikehendaki. Parameter-parameter tersebut adalah tegangan (kV), arus tabung (mA) dan waktu paparan (s). Kualitas radiasi yang digunakan adalah *narrow*. Dalam pemrosesan data suatu sinar sempit (*narrow beam*) yang dihasilkan oleh sinar-X dapat dipengaruhi oleh adanya filter, kolimator, dan detektor.

Berdasarkan uraian diatas, diperlukan penelitian tentang kurva kalibrasi dosimeter perorangan TLD buatan Harshaw menggunakan sinar-X energi rendah sesuai dengan kondisi di lapangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu bagaimana respon dari TLD Harshaw terhadap paparan sumber radiasi pesawat sinar-X dengan energi rendah, bagaimana bentuk kurva kalibrasi TLD Harshaw terhadap

radiasi sinar-X energi rendah, dan bagaimana hasil dari ketidakpastian kurva kalibrasi dari TLD Harshaw.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah dosimeter perorangan yang digunakan adalah dosimeter TLD LiF:Mg,Ti jenis 700 buatan Harshaw USA, paparan radiasi yang digunakan adalah paparan radiasi pesawat sinar-X dengan energi rendah, energi yang diamati pada penelitian ini adalah energi 12,7 16,5 dan 20,4 keV dengan dosis ekuivalen kedalaman yang digunakan pada penelitian ini adalah Hp (10) dengan kedalaman 10 mm yang mewakili dosis seluruh tubuh, fantom yang digunakan adalah water solid fantom PMMA dengan ukuran 30 x 30 x 15 cm³.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tentang kalibrasi dosimeter perorangan TLD Harshaw terhadap paparan sinar-X energi rendah ini adalah dapat diperoleh tanggapan TLD LiF:Mg,Ti buatan Harshaw terhadap paparan sinar-X energi rendah, didapatkan kurva kalibrasi TLD LiF:Mg,Ti buatan Harshaw terhadap paparan radiasi sinar-x energi rendah, dan dapat mengetahui ketidakpastian kurva kalibrasi dari dosimeter TLD LiF:Mg,Ti buatan Harshaw.

1.5 Manfaat

Kurva kalibrasi dosimeter perorangan yang diperoleh digunakan sebagai informasi untuk evaluasi dosis dari dosimeter perorangan TLD LiF: Mg,Ti terhadap radiasi sinar-X energi rendah.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi

Radiasi merupakan salah satu cara perambatan energi dari suatu sumber energi ke lingkungannya tanpa membutuhkan medium atau bahan penghantar tertentu (CNSC, 2012). Sifat dari radiasi yaitu tidak dapat dirasakan sama sekali oleh panca indra manusia, diperlukan suatu alat pengukur radiasi untuk mendeteksi dan mengukur radiasi (Batan, 2016). Materi yang dilewati oleh radiasi akan menimbulkan sebagian radiasi menembus materi, sebagian radiasi terhambur dan ada yang berinteraksi dengan atom atau molekul penyusun materi. Energi yang dimiliki radiasi dapat mengionisasi materi yang dilewatinya (Bapeten, 2010). Radiasi elektromagnetik memiliki sifat ketika berinteraksi di dalam ruang, dimana radiasi elektromagnetik berperilaku seperti gelombang namun ketika berinteraksi dengan atom dan molekul maka berkas radiasi seperti aliran paket energi yang disebut dengan foton. Energi foton dipengaruhi oleh frekuensi dan panjang gelombang. Jika dirumuskan maka persamaan untuk energi foton adalah (Hecht dan Bueche, 2006).

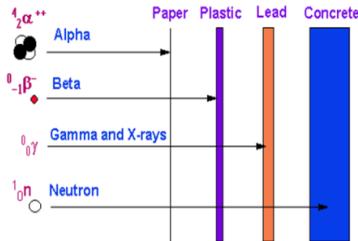
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Berdasarkan bentuk radiasi yang dimiliki, radiasi terbagi menjadi radiasi pengion dan radiasi non pengion.

2.1.1 Radiasi Pengion

Radiasi pengion adalah radiasi yang jika menumbuk sesuatu, akan muncul partikel bermuatan listrik yang disebut ion, peristiwa ini adalah ionisasi (Arief, 2016). Radiasi pengion dapat mengionisasi materi baik secara langsung dan tidak langsung karena energi yang dimiliki radiasi pengion melebihi dari potensi ionisasi materi yang menyebabkan perubahan pada tingkat molekul, jaringan dan sistemik tubuh. Adapun contoh radiasi pengion secara langsung seperti : partikel alpha, beta, sinar-X, gamma dan neutron (Suliman, 2011).

Daya tembus radiasi pengion berbeda-beda terhadap materi, dengan partikel alpha menempati posisi sebagai partikel yang memiliki daya tembus paling rendah dan partikel neutron merupakan partikel dengan daya tembus paling besar. Berikut ini merupakan penjelasan yang tepat untuk mendefinisikan daya tembus radiasi pengion yang tertera pada Gambar 2.1 (Pusdiklat BATAN, 2006).



Gambar 2.1 Daya tembus radiasi pengion pada materi (Pusdiklat BATAN, 2006).

2.1.2 Radiasi Non Pengion

Radiasi non pengion dapat didefinisikan sebagai penyebaran atau emisi energi. Apabila radiasi non pengion melewati suatu media dan terjadi penyerapan, berkas energi radiasi tidak mampu menginduksi terjadinya proses ionisasi dalam media tersebut karena energi lebih rendah dari potensi ionisasi materi (energi minimum yang diperlukan untuk ionisasi). Radiasi non pengion mengacu pada radiasi elektromagnetik dengan energi lebih kecil dari 10 eV dengan panjang gelombang (> 100 nm). Contoh dari radiasi non pengion adalah sinar ultra violet, cahaya tampak, infra merah, gelombang mikro (*microwave*), gelombang radio dan *Extremely low-frequency* (ELF). Daya tembus dari radiasi non pengion tergantung dari frekuensi yang dimiliki (Lusiyanti dan Zubaidah, 2001).

2.2 Dosis ekivalen personal

Dosis ekivalen personal $H_p(d)$ adalah dosis ekivalen pada jaringan. Menurut ICRU (*International Commission on Radiation Units and Measurement*), komposisi massa pada jaringan terdiri dari 76,2% oksigen, 11,1% karbon, 10,1% hidrogen dan 2, 6% nitrogen. Satuan dari dosis ekivalen personal adalah sievert (Sv). Kedalaman

pada dosis ekuivalen personal dinyatakan dengan d , dan dinyatakan dalam milimeter. Daya tembus radiasi yang lemah dengan kedalaman 0,07 mm pada kulit dan 3 mm pada mata dilambangkan dengan $H_p(0,07)$ dan $H_p(3)$. Radiasi dengan daya tembus kuat yaitu dengan kedalaman 10 mm, dilambangkan dengan $H_p(10)$ (IAEA, 2000). Penentuan dosis perorangan dengan radiasi daya tembus kuat digunakan dosis ekuivalen $H_p(10)$, dengan kedalaman 10 mm di bawah permukaan kulit (Akhadi, 1996). Besaran operasional dalam pemantauan individu adalah $H_p(10)$ dan $H_p(0,07)$, dosimeter perorangan digunakan untuk mewakili paparan radiasi pada tubuh. Keseragaman paparan seluruh tubuh diwakili dengan $H_p(10)$ yang dapat memberikan nilai dosis efektif untuk proteksi radiasi (Batan, 2011). Diketahui bahwa, energi rendah pada sinar-X dengan energi <15 keV dapat digolongkan sebagai $H_p(0,07)$ (Wintle, McKeever, 2003), namun dilihat dari daya tembus yang dimiliki oleh sinar-X tergolong daya tembus yang sangat besar, daya tembus sinar-X dapat menembus bahan dengan massa yang padat sekalipun, daya tembus sinar-X akan semakin besar jika panjang gelombang sinar-X semakin kecil, sehingga karakteristik sinar-X dengan daya tembus yang kuat dapat dikategorikan sebagai $H_p(10)$ meskipun energi sinar-X tersebut tergolong energi rendah (USU, 2016).

2.3 Dosis Radiasi

2.3.1 Dosis Serap (D)

Dosis serap (D) adalah energi rata-rata yang diberikan oleh radiasi pengion dE terhadap bahan yang dikenainya dengan massa (m) dalam volume (V). Persamaan yang tepat untuk menyatakan dosis serap dapat dituliskan sebagai berikut (Bapeten, 2016).

$$D = \frac{dE}{dm} \text{ (satuan Gy)} \quad (2)$$

Satuan dari dosis serap dalam satuan internasional (SI) adalah Joule/kg dan sama dengan gray (Gy), dimana satu gray mewakili energi rata-rata yang bernilai 1 joule dan diserap dalam bahan dengan massa sebesar 1 kg.

$$1 \text{ gray (Gy)} = 1 \text{ joule/kg} \quad (3)$$

Rad merupakan satuan lama, satu rad merupakan energi rata-rata yang diserap oleh bahan pada massa sebesar 1 gram.

$$1 \text{ gray (Gy)} = 100 \text{ rad} \quad (4)$$

Berbeda halnya dengan paparan yang hanya berlaku untuk radiasi gamma dan sinar-X dalam medium udara. Paparan adalah kemampuan radiasi foton (sinar-X dan gamma) untuk menimbulkan ionisasi di udara. Satuan paparan adalah coulomb/kilogram (C/kg), satuan yang masih digunakan untuk menyatakan besaran paparan adalah Roentgen (R)

$$1 \text{ Roentgen} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg.} \quad (5)$$

Persamaan yang tepat untuk menyatakan hubungan dosis serap dengan paparan adalah

$$D = f \times X \quad (6)$$

dimana :

D = dosis serap (Rad)

X = paparan (R)

f = faktor konversi yang berasal dari laju paparan ke laju dosis serap (Rad/R)

2.3.2 Dosis Ekivalen (H_T)

Dosis Ekivalen (H_T) adalah dosis serap yang diterima oleh seluruh tubuh manusia dan memperhatikan kualitas radiasi yang dapat merusak jaringan tubuh. Efek biologi yang berbeda akan ditimbulkan pada sistem tubuh ketika tubuh menerima dosis serap yang sama namun berasal dari jenis radiasi yang berbeda. Berikut ini adalah persamaan dari dosis ekivalen yang merupakan hasil kali antara dosis serap (D) dan faktor kualitas (Q). Satuan dosis ekivalen adalah Sievert (Sv) (Bapeten, 2016).

$$H_T = D \times Q \quad (7)$$

Besaran yang termasuk kuantitas radiasi dan dapat menimbulkan kerusakan pada jaringan/organ disebut dengan faktor bobot radiasi (W_r). Sehingga rumus dosis ekuivalen adalah

$$H_T = D \times W_r \quad (8)$$

Satuan dosis ekuivalen yang dinyatakan dalam sievert (Sv) berhubungan dengan satuan lama dalam dosis ekuivalen yaitu rem. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$1 \text{ sievert (Sv)} = 100 \text{ rem} \quad (9)$$

Faktor bobot radiasi menurut jenis dan kelompok energi radiasi seperti pada Tabel 2.1 (NCRP, 1993).

Tabel 2.1 Nilai faktor bobot berbagai jenis radiasi (NCRP, 1993).

Jenis Radiasi	W_r
1. Foton, untuk semua energi	1
2. Elektron dan Muon, semua energi	1
3. Neutron dengan energi	
a. < 10 keV	5
b. 10 keV hingga 100 keV	10
c. > 100 keV hingga 2 MeV	20
d. > 2 MeV hingga 20 MeV	10
e. > 20 MeV	5
4. Proton, selain proton recoil, dengan Energi > 2 MeV	5
5. Partikel alpha, fragmen fisi, inti berat	20

2.3.3 Dosis Efektif (E_T)

Dosis efektif (E_T) adalah besaran dosis yang memperhatikan sensitifitas organ/jaringan yang terpapar radiasi. Setiap organ/jaringan memiliki efek yang berbeda ketika menerima dosis tersebut. Dosis efektif (E_T) perlu memperhatikan tingkat kepekaan organ/jaringan tubuh terhadap efek stokastik yang disebut dengan faktor bobot organ/faktor bobot jaringan tubuh. Satuan dosis efektif

adalah rem atau Sievert. Persamaan Dosis efektif (E_{τ}) adalah sebagai berikut (Bapeten, 2016).

$$E_{\tau} = H_T \times \omega_t \tag{10}$$

dimana :

E_{τ} = dosis efektif

H_T = dosis ekivalen

ω_t = faktor bobot jaringan

Berikut ini adalah faktor bobot organ/jaringan tubuh yang dapat dilihat pada Tabel 2.2 (NCRP, 1993).

Tabel 2.2 Nilai faktor bobot berbagai organ tubuh (NCRP, 1993).

No.	Organ atau Jaringan Tubuh	W_T
1	Gonad	0,20
2	Sumsum tulang	0,12
3	Colon	0,12
4	Lambung	0,12
5	Paru-paru	0,12
6	Ginjal	0,05
7	Payudara	0,05
8	Liver	0,05
9	Oesophagus	0,05
10	Kelenjar Gondok (Tiroid)	0,05
11	Kulit	0,01
12	Permukaan tulang	0,01
13	Organ atau jaringan tubuh sisanya	0,05

2.4 Kerma

Kerma (*Kinetic Energy Released per Unit Mass*) adalah energi rata-rata yang ditransfer secara tidak langsung oleh radiasi pengion untuk partikel bermuatan pada benda bermassa (Suliman,2011).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \tag{11}$$

Dimana E_{tr} adalah rata-rata energi yang ditransfer ke elektron. Kerma pada sinar-X berasal dari energi yang ditransfer ke elektron dan positron. Kerma dalam satuan SI adalah joule per kilogram atau gray. Kerma menurun secara kontinu apabila dosis yang diterima semakin meningkat, apabila semakin besar dosis yang diserap maka bertambah pula kedalaman karena densitas dari partikel juga meningkat yang dipengaruhi oleh ionisasi pertama dan ionisasi sekunder, sehingga diperoleh nilai maksimum. Kemudian terjadi penurunan dosis yang terserap seiring terjadi penurunan kedalaman secara kontinu. Besaran yang mempengaruhi pengukuran kerma udara adalah tekanan dan temperatur yang berasal dari alam, kebocoran yang ditimbulkan dari dosimeter dan yang ditimbulkan dari medan radiasi seperti kualitas berkas, laju dosis, dan ukuran lapangan (*field Size*) (Fendinugroho, Nazaroh, 2010). Pengukuran kerma udara tergantung pada jumlah muatan di udara yang terukur tergantung pada aktivitas sumber dan kualitas berkas. Satuan dari laju kerma udara adalah $\mu Gy/s$ atau $\mu Gy/h$ yang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Sunaryati, Susetyo, dan Nazaroh, 2010).

$$Ku = M \times k_{PT} \times N_k \quad (12)$$

dimana :

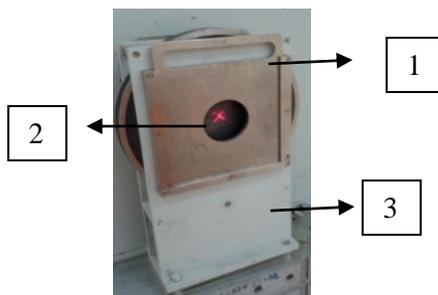
M = hasil pengukuran (nC/ menit)

k_{PT} = koreksi densitas udara (tekanan dan suhu udara) terhadap kondisi standar ($P_o = 1013$ mbar dan $T_o = 20^\circ C$)

N_k = koefisien kalibrasi kerma udara ($\mu Gy/nC$)

2.5 Kolimator Pesawat Sinar-X

Kolimator adalah salah satu bagian dari pesawat sinar-X yang memiliki fungsi sebagai pengatur besarnya ukuran lapangan radiasi yang memiliki celah di tengah permukaannya. Kolimator berbentuk plat dengan bahan timbal sebagai pembentuk lapangan radiasi. Sesuai dengan peraturan kepala (PERKA) BAPETEN No. 9 Tahun 2011 tentang uji kesesuaian pesawat sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensial Pasal 5, kolimator merupakan salah satu parameter yang harus diuji dan dapat menentukan kelayakan operasi pesawat sinar-X. Kolimator pesawat sinar-X ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kolimator pesawat sinar-X terdiri dari: 1. plat kolimator, 2. cermin kolimator, 3. rumah kolimator.

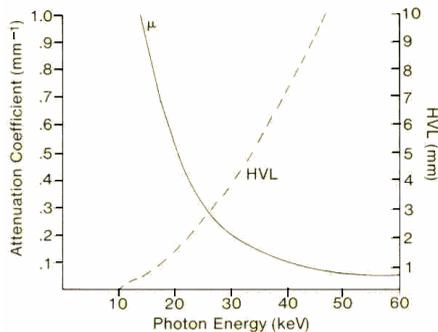
Proteksi radiasi memiliki peran penting terhadap pembatasan luas lapangan sinar-X sehingga untuk membatasinya digunakan kolimator. Spesifikasi kolimator terdiri dari rumah kolimator, plat kolimator, dan cermin kolimator yang berfungsi sebagai tempat keluarnya berkas sinar-X yang ditandai dengan laser untuk mengarahkan berkas sinar-X pada TLD yang diletakkan di permukaan depan fantom. Rumah kolimator sebagai tempat diletakkannya kolimator depan dan belakang. Peletakkan filter HVL diletakkan di bagian depan kolimator dan filter tambahan diletakkan di bagian belakang kolimator yang berada di dekat sumber radiasi (USU, 2016).

2.6 Kualitas Berkas Sinar Radiasi (HVL)

Berkas sinar-X yang memiliki energi rendah memiliki daya tembus yang lebih rendah. Kemampuan untuk menembus atau daya tembus berkas sinar-X dikenal dengan kualitas berkas radiasi (HVL). Kualitas radiasi mengacu pada kemampuan menembus sinar-X, kemampuan penetrasi sinar-X tergantung pada energi yang diberikan (Aziz, 2007). Half Value Layer (HVL) adalah ketebalan bahan (dalam milimeter) yang dibutuhkan untuk mengurangi intensitas berkas radiasi menjadi setengah dari intensitas semula (IAEA,2000). HVL juga dapat dipengaruhi oleh penetrasi, apabila kemampuan penetrasi meningkat maka dapat meningkatkan HVL.

Pengecekan besarnya nilai kualitas radiasi pada sumber sinar-X energi rendah digunakan dengan memasang filter tambahan (*added filter*) yang sesuai dengan masing-masing energi yang diberikan

dalam penelitian ini. Karena berupa filter tambahan, maka filter ini dapat diatur penggunaannya dan diletakkan di belakang kolimator. Pengecekan nilai kualitas radiasi juga tergantung pada penggunaan detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc. Bahan untuk filter tambahan tergantung pada energi dari sinar-X (Aziz, 2007). Bahan filter yang digunakan pada penelitian ini adalah Aluminium (Al). Hal tersebut karena sifat Aluminium mempunyai sifat absorpsi yang sesuai untuk sinar-X energi rendah. Dengan demikian, HVL setara dengan beberapa milimeter Al. Aluminium yang digunakan sebagai filter pada penelitian ini juga dapat digunakan untuk mengukur kemampuan penetrasi (HVL) dari sinar-X. Nilai koefisien atenuasi menurun lebih cepat seiring peningkatan energi foton dan menyebabkan kemampuan penetrasi meningkat (Aziz, 2007). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan antara koefisien atenuasi dan hvl untuk aluminium (Aziz, 2007).

2.7 Karakteristik Material TLD

TLD tergolong kedalam detektor atau alat ukur pasif karena hasil pengukuran pada TLD tidak dapat dibaca langsung ketika terpapar radiasi, perlu adanya tahapan terlebih dulu untuk mengetahui besar cacahan dalam TLD tersebut. TLD yang digunakan dalam penelitian ini adalah TLD jenis 700 dengan pengotor (impuritas) LiF yang memiliki empat elemen dimana ketiga elemen yaitu elemen 1, 2, dan 3 adalah TLD jenis 700 dan elemen ke-4 adalah TLD jenis 600. Fosfor ⁷LiF peka terhadap radiasi β dan foton (Sinar-X dan γ). Sedangkan fosfor ⁶LiF juga peka terhadap foton, radiasi β dan neutron. Namun kandungan ⁷LiF

jauh lebih besar dibandingkan ${}^6\text{LiF}$ dari segi kandungan LiF alam, LiF alam hanya peka terhadap radiasi β dan foton saja. LiF dapat memancarkan cahaya jika kristal tersebut dipanaskan setelah terpapar radiasi, energi yang diserap oleh kristal menimbulkan atom-atom dalam kristal yang akan menghasilkan elektron-elektron dan lubang dalam kristal tersebut (Thamrin, 1998). TLD LiF: Mg, Ti diproduksi oleh Harshaw Company. Sebelum digunakan, perlu *annealing* untuk meminimalkan respon yang terbaca pada TLD atau mengosongkan informasi radiasi yang terdapat pada dosimeter tersebut. Respon TL yang dimiliki sangat stabil terhadap waktu dan emisi yang dihasilkan TL tinggi terhadap dosis radiasi yang sangat rendah (Winata, 2011).

Pada penelitian ini fosfor termoluminesensi yang digunakan adalah Litium Florida TL-700 dengan tipe kartu 8814. *Thermoluminence* dengan bahan LiF memiliki sensitifitas tinggi yang memiliki respon energi sangat baik karena respon yang dimiliki setara dengan jaringan pada seluruh tubuh manusia (Thermo Scientific, 2007). Bahan LiF berbentuk polikristal dengan Z efektifnya adalah 8,1. Hal ini cukup ekivalen dengan Z efektif jaringan tubuh manusia yang bernilai 7,4. Keadaan standar LiF mengandung 92,5% ${}^7\text{Li}$ dan 7,5% ${}^6\text{Li}$. Pada chip TLD 700 elemen 2 memiliki ketebalan 0,38 mm (0,015”) dengan kombinasi antara Politetrafluoroetilena (PTFE) dan Acrylonitrile-butadine-styrene (ABS) (Thamrin, 1998). Dosimeter TLD LiF: Mg, Ti buatan Harshaw ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2.4 Dosimeter standar TLD Harshaw yang terdiri dari empat elemen (PNNL, 2010).



Gambar 2.5 Harshaw TLD card tipe 7776 dan holder tipe 8814 (Rofiq, 2006).

2.8 Fading (Pemudaran)

TLD memiliki beberapa faktor yang mempengaruhi pembacaan. Faktor-faktor tersebut adalah suhu, kelembaban dan faktor *fading*. *Fading* adalah hilangnya muatan pembawa pada dosimeter TLD selama waktu tertentu yang disebabkan ketika TLD disimpan dalam waktu yang lama dan mengalami kelemahan dalam hal pembacaan tanggapan (respon) , untuk mengurangi beberapa faktor tersebut maka TLD perlu disimpan di ruangan berpendingin (AC) (Rofiq, 2006). TLD LiF: Mg, Ti jenis 700 buatan Harshaw memiliki faktor

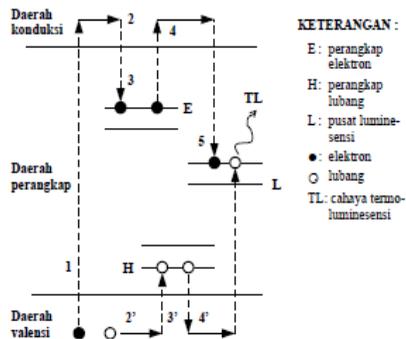
fading $\pm 5\%$ dalam 3 bulan. Penyebab yang dapat memicu adanya efek *fading* adalah efek termal. Efek termal *fading* terjadi ketika elektron berada pada *traps* (perangkap) yang lebih dangkal akan keluar lebih cepat dibandingkan posisi elektron pada *traps* yang lebih dalam. Keadaan ini disebabkan karena probabilitas transisi yang lebih besar. Proses keluarnya elektron dari *traps* karena mendapat energi yang cukup, energi yang didapat berupa energi termal. Faktor *fading* dapat dikalikan dengan besarnya cacahan yang didapat dari pembacaan TLD (Verdianto, 2012). *Fading* disebabkan pula karena adanya pengaruh paparan cahaya (*optical fading*) sehingga cahaya yang keluar akan sedikit ketika pembacaan dosimeter TLD (Winata, 2011).

2.9 Prinsip Kerja Thermoluminescence Dosimeter

Termoluminesensi adalah emisi cahaya yang dihasilkan dari pemanasan setelah terpapar oleh radiasi. Pancaran cahaya termoluminesensi berasal dari benda padat yang memiliki struktur kristal. Termoluminesensi dapat terjadi karena adanya kerusakan pada benda padat dengan struktur kristal. Kerusakan yang terjadi pada benda padat disebabkan oleh adanya bahan-bahan asing (pengotor) yang terdapat dalam kristal. Dari kerusakan kisi-kisi pada struktur kristal tersebut terbentuk pusat-pusat muatan listrik yang dapat menarik muatan listrik tak sejenis. Pusat muatan tersebut dinamakan dengan perangkap. prinsip kerja dosimeter ini berdasarkan fenomena termoluminesensi (TL), fenomena ini terkait dengan konsep pita energi elektron (model pita). Dalam model pita ini terdapat pita larangan yang memisahkan tingkat-tingkat energi tertentu.

Proses terjadinya peristiwa termoluminesensi terdapat beberapa tahapan, dimana pada tahap pertama elektron bebas yang telah menyerap energi radiasi melompat dari pita valensi menuju pita konduksi. Elektron dapat bergerak bebas dalam pita konduksi pada tahap kedua, pada tahap ketiga elektron terperangkap di dalam pusat muatan positif atau perangkap elektron. Perlu dipahami bahwa jumlah elektron yang terperangkap sebanding dengan jumlah ionisasi yang terjadi, jumlah ionisasi sebanding dengan energi atau dosis radiasi yang diterima. Elektron yang bergerak menuju pita konduksi meninggalkan lubang bermuatan positif di dalam pita valensi dan

terperangkap di dalam pusat muatan negatif. Pada langkah ke empat, elektron- elektron yang terperangkap perlu mendapatkan energi yang cukup untuk melepaskan diri dari perangkap. Upaya yang tepat guna melepaskan elektron-elektron dari perangkap adalah dengan proses pemanasan dari luar, setelah elektron terlepas dari perangkap maka terjadi proses penggabungan antara elektron dengan lubang di pusat luminesensi pada langkah kelima yang menyebabkan terjadinya pancaran cahaya termoluminesensi (TL) dan intensitasnya dapat diukur (Thamrin,2002). Berikut ini adalah prinsip kerja TLD yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.

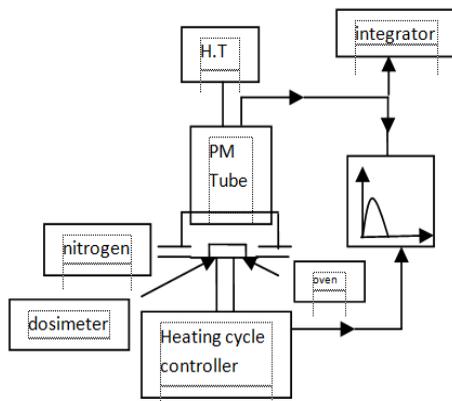


Gambar 2.6 Proses terjadinya peristiwa termoluminesensi pada TLD (Thamrin,2002).

2.10 Pembacaan Dosimeter TLD Menggunakan TLD Harshaw Reader

TLD LiF:Mg,Ti merupakan detektor pasif karena dalam mendeteksi radiasi yang terpapar dibutuhkan alat baca yaitu TLD reader model 6600. Dosimeter TLD ditempatkan pada *tray* sebelum dipanasi, *tray* terbuat dari bahan metal dan dipanaskan di dalam coil pemanas. Ketika TLD dipanasi menyebabkan elektron berada dalam keadaan awal (*ground state*) memancarkan energi yang berupa cahaya. Pancaran dari cahaya dihitung dengan menggunakan *Photo Multiplier Tube* (PMT) dan intensitas cahaya diubah menjadi sinyal elektrik yang dikuatkan. Proses ini dinamakan dengan Thermoluminisensi. Dalam pembacaan, TLD *Reader* Harshaw model 6600 dapat menampung 200 kartu TLD, sistem pemanasan yang

digunakan pada pembacaan ini menggunakan aliran gas nitrogen untuk memanaskan elemen TLD, transfer panas dari gas ke kartu dosimeter sangat efisien dengan pembacaan yang relatif cepat. Pemanasan dari gas tersebut dapat menghasilkan kurva cahaya yang tergambar pada layar monitor komputer. Dalam operasi pembacaan menggunakan TLD Reader Harshaw terdapat tombol *start* dan *stop* yang digunakan untuk kontrol pembacaan (model 6600) (PNNL, 2010). Perangkat dari TLD Reader dihubungkan dengan PC, hasil yang terukur dapat berupa *print out* atau dapat disimpan. (Verdianto,2012). Perangkat TLD Harshaw Reader juga didukung dengan *software* WinREMS untuk penerapan pada PC eksternal (ThermoScientific, 2007). Proses TLD Reader Harshaw ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema proses TLD Reader Harshaw untuk mendeteksi radiasi yang terpapar pada TLD (Savva, 2010).

2.11 Water Solid Fantom PMMA

Water solid fantom PMMA digunakan untuk irradiasi kartu TLD, dimana kartu TLD diletakkan di permukaan depan fantom, slab fantom diproduksi oleh PTW-Germany dan mewakili tubuh manusia, dimana ukuran dari fantom tersebut adalah 30 cm x 30 cm x 15 cm³ yang disarankan oleh *International Commission on Radiation Units and Measurement* (ICRU). Water solid fantom PMMA terbuat dari materi yang ekivalen dengan jaringan, ekivalen jaringan merupakan bahan yang memiliki sifat hamburan maupun

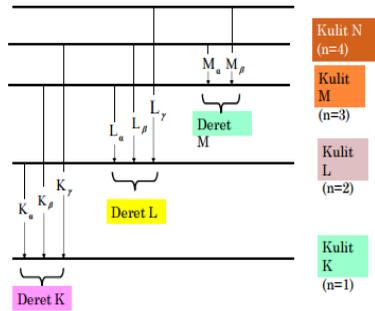
penyerapannya sama dengan sifat pada jaringan biologi (Kartikasari, 2015). Ketebalan bagian depan water solid fantom adalah 2,5 mm dan pada sisi lain phantom ketebalannya sebesar 10 mm (IAEA,2000). Water solid fantom digunakan untuk berbagai jenis dosimeter pribadi yang dapat mengukur Hp (0,07) pada kedalaman 7 mm dan Hp (10) yang memiliki kedalaman 10 mm. Komposisi bahan dari fantom terbuat dari akrilik atau PMMA (*Polymethyl Methacrylate*) dan fantom merupakan model fisis untuk simulasi karakteristik terhadap interaksi radiasi yang terjadi pada tubuh manusia (PTW, 2012). Water solid fantom PMMA dinyatakan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Water solid fantom PMMA untuk kalibrasi personal dosimeter (IAEA, 2000).

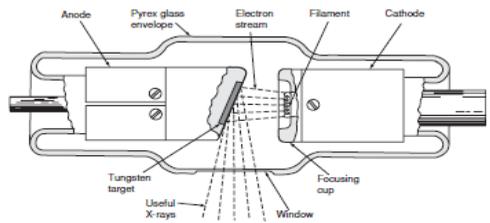
2.12 Sinar-X

Sinar-X merupakan jenis radiasi pengion yang dipancarkan oleh partikel bermuatan (elektron) dengan energi tinggi, dimana tegangan yang diberikan cukup besar. Elektron tersebut menumbuk elektron pada inti atom, sehingga pada kulit atom terjadi kekosongan. Kekosongan tersebut diisi oleh elektron yang berasal dari orbital terluar. Ketika perpindahan elektron dari kulit terluar ke kulit dalam terjadi pancaran gelombang elektromagnet yang dinamakan dengan sinar-X. Spektrum sinar-X dapat ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Transisi eksitasi dari sinar-X (Bahri, 2005).

Energi dan panjang gelombang pada sinar-X berbanding terbalik. Perlu dipahami bahwa peningkatan arus filamen (mA) dan tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan radiasi karakteristik pada target (kV) akan menghasilkan peningkatan intensitas sinar-X yang dihasilkan (Connolly, 2012). Tegangan (kV) adalah daya dorong elektron agar dapat menembus objek. Salah satu karakteristik dari sinar-X adalah sinar-X dapat diarahkan ke sebuah objek, dimana beberapa foton diserap atau tersebar. Sinar-X dihasilkan oleh tabung sinar-X yang dapat menghasilkan, mempercepat, dan menumbukkan elektron bebas pada target (Timorti, Marjanto, dan Trikasjono, 2009). Filamen yang berada pada tabung sinar-X terbuat dari tungsten. Parameter yang terdapat pada pengoperasian pesawat sinar-X terdiri atas *power supply* (catu daya DC) yang berasal dari sumber PLN, pengatur tegangan (kV), pengatur arus (mA), pengatur waktu (s) (Suyatno, 2008). Gambar 2.10 menunjukkan skema dari tabung sinar-X.



Gambar 2.10 Skema tabung sinar-X yang dilengkapi dengan dua elektroda, yaitu: anoda dan katoda (Timorti, Marjanto, dan Trikasjono, 2009).

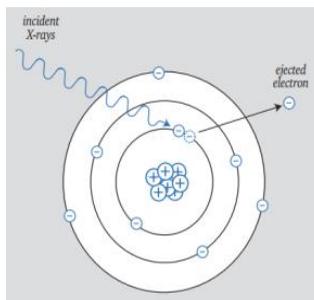
2.13 Interaksi Sinar-X

Interaksi sinar-X jika pada suatu materi akan terjadi jika sinar-X dikenakan pada suatu objek. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik dengan energi yang cukup besar, gelombang elektromagnetik ini disebut dengan foton yang dapat merambat sesuai garis lurus. Interaksi yang terjadi jika sinar-X mengenai suatu objek adalah interaksi antara foton dengan atom-atom pada objek tersebut. Interaksi sinar-X dengan materi juga melibatkan energi. Energi foton yang meningkat maka akan menurunkan probabilitas interaksi (atenuasi) dan dapat meningkatkan penetrasi (Aziz, 2007). Radiasi sinar-X yang mengenai suatu materi akan terjadi interaksi. Terdapat 3 proses penting yang terjadi pada interaksi sinar-X dengan materi, proses tersebut adalah :

1. Efek Fotolistrik
2. Efek Compton
3. Produksi pasangan

2.13.1 Efek fotolistrik

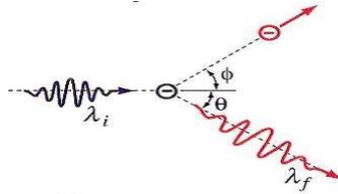
Efek fotolistrik terjadi ketika foton berinteraksi dengan materi dan menumbuk atom dari materi tersebut yang menyebabkan terlepasnya elektron pada kulit bagian dalam dan menyerap seluruh energi foton yang mengenainya. Contoh efek fotolistrik adalah sinar-X karakteristik yang diproduksi oleh tabung sinar-X. Elektron yang terlepas dalam proses ini dinamakan dengan fotoelektron, energi yang dimiliki sebesar energi sinar-X yang mengenainya. Proses efek fotolistrik ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Skema efek fotolistrik pada atom (Carlsson, 1996).

2.13.2 Efek Compton

Efek Compton adalah interaksi antara sinar-X dengan elektron bebas atau elektron yang terikat lemah pada lapisan kulit terluar, efek compton terjadi ketika sinar-X yang datang dibelokkan arahnya pada sudut θ dari arah sebelumnya. Energi dari sinar-X ditransfer ke elektron diam yang dinamakan elektron *recoil*. Hamburan Compton dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Hamburan Compton: tabrakan elastis antara foton dan elektron (Johnson dan Cember, 2009).

Sinar-X dengan panjang gelombang λ yang energinya $h\nu$ menumbuk elektron bebas. Elektron bebas yang diam menyerap sebagian energi foton dan mengakibatkan perubahan menjadi λ' dan $h\nu'$ dengan elektron yang terhambur membentuk sudut θ , panjang gelombangnya pun menjadi lebih besar, yang dinyatakan sebagai

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (13)$$

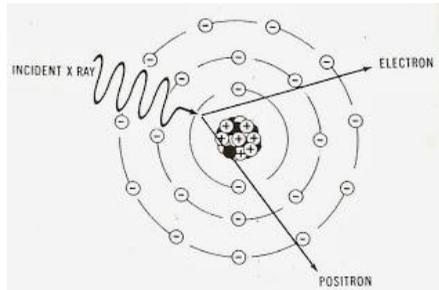
Dimana m adalah massa diam elektron dengan c merupakan kecepatan cahaya dan h adalah konstanta Planck, kemudian diperoleh sudut ϕ ketika elektron terpental (Noerwasana, 2010).

2.13.3 Produksi Pasangan

Produksi pasangan terjadi saat sinar-X dan sinar gamma memiliki energi yang cukup besar yaitu (di atas 1 MeV). Jika menghantam sebuah inti atom dapat mengubah energi menjadi massa yang bergerak dengan kecepatan tertentu.

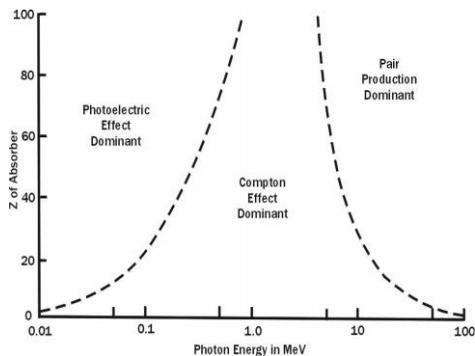
Energi foton yang ditransfer berupa pasangan elektron dan positron. Positron dan elektron akan kehilangan energi kinetiknya dari proses eksitasi dan ionisasi (Amsori, 2009). Positron merupakan

partikel yang identik dengan elektron namun bermuatan positif. Mekanisme produksi pasangan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Skema representasi produksi pasangan (Johnson dan Cember, 2009).

Interaksi dari foton dengan bahan ditunjukkan oleh daerah yang dominan sebagai fungsi dari energi foton dan nomor atom Z . Efek fotolistrik dominan pada nomor atom tinggi dengan energi yang dominan adalah energi rendah, efek Compton dominan pada nomor atom rendah dan terjadi pada energi medium. Produksi pasangan terjadi pada energi yang tinggi dengan nomor atom yang tinggi lebih dominan pada proses ini (Knoll, 2010). Interaksi foton dengan bahan ditunjukkan pada Gambar 2.14.



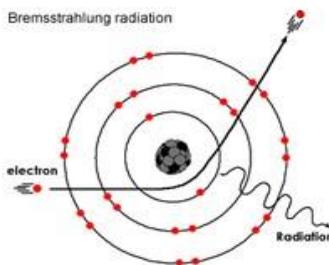
Gambar 2.14 Interaksi foton dengan bahan yang terdiri dari: Efek fotolistrik, Compton, dan produksi pasangan (Connolly, 2012).

2.14 Proses terjadinya Sinar-X

Proses terjadinya Sinar-X terdiri dari dua macam, yaitu :

1. Sinar-X *Bremsstrahlung*

Berasal dari akibat pengereman elektron oleh anoda. Proses terjadinya sinar-X *bremsstrahlung* adalah ketika elektron bergerak dengan kecepatan tinggi mendekati inti atom, gaya elektrostatis inti atom yang kuat menyebabkan arah elektron berbelok dengan tajam, sehingga energi elektron hilang dengan memancarkan radiasi elektromagnetik yang disebut sebagai sinar-X *bremsstrahlung* (Akhadi, 2006). Spektrum sinar-X *bremsstrahlung* ditunjukkan pada Gambar 2.15.



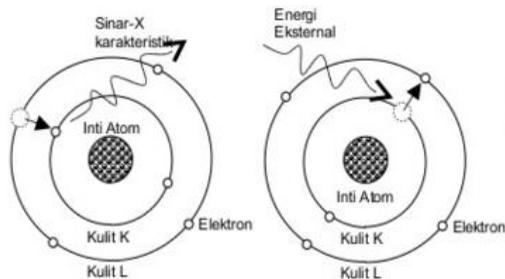
Gambar 2.15 Proses terjadinya sinar-X *bremsstrahlung* (Bushberg, 2002).

Spektrum sinar-X *bremsstrahlung* untuk beberapa harga tegangan tinggi yang digunakan, semakin besar tegangan tinggi yang digunakan maka semakin kecil harga λ_{min} yang dihasilkan (Kardiawarman, 1996).

2. Sinar-X Karakteristik

Proses terjadinya sinar-X karakteristik diakibatkan adanya proses transisi elektron di dalam anoda (Kardiawarman, 1996). Elektron proyektil dengan energi tinggi berinteraksi pada elektron dalam tiap kulit atom, elektron di dalam atom dapat berpindah ke lintasan lainnya, lintasan yang dilewati oleh elektron menentukan tingkat energi elektron dalam lintasan. Proses terbentuknya sinar-X karakteristik karena elektron atom pada kulit K terionisasi sehingga

elektron yang berada pada kulit K tersebut meloncat keluar dan mengakibatkan kekosongan pada kulit K ini, namun kekosongan ini diisi oleh elektron yang berada pada kulit di luarnya. Energi yang dilepaskan saat transisi dikenal dengan foton sinar-X karakteristik, energi dihasilkan baik dari transisi yang berasal dari lintasan luar ke dalam dan sebaliknya dari lintasan dalam ke lintasan luar. Energi pada proses transisi elektron dari kulit yang lebih dalam ke kulit luar harus lebih besar dibandingkan selisih tingkat energi. Proses ini dinamakan eksitasi (Akhadi, 2006). Elektron yang tereksitasi dinyatakan tidak stabil dan elektron yang kembali ke lintasan semula atau pada keadaan ekuilibrium, dimana energi yang dipancarkan oleh elektron berupa radiasi elektromagnetik (Kardiawarman, 1996). Dapat disimpulkan bahwa sinar-X karakteristik adalah transisi elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah yang dijelaskan pada Gambar 2.16 (Akhadi, 2006).



Gambar 2.16 Proses terjadinya sinar-x karakteristik (Akhadi, 2006).

2.15 Proteksi Radiasi

Keselamatan radiasi bertujuan untuk membatasi peluang terjadinya resiko yang diterima oleh masyarakat, pekerja radiasi dan lingkungan akibat timbulnya bahaya radiasi. Teknik kesehatan lingkungan dipelajari dalam proteksi radiasi yang berkaitan tentang pemberian proteksi kepada seseorang yang positif terkena radiasi pengion (Sari, 2012). Prinsip proteksi radiasi terdiri dari asas justifikasi, optimasi dan limitasi (Daryoko M & Zainus S, 2003).

1. Justifikasi

Setiap kegiatan yang menggunakan zat radioaktif harus diperoleh manfaat yang lebih besar dibandingkan resiko yang

ditimbulkan (Daryoko M & Zainus S, 2003). Faktor-faktor yang dipertimbangkan dalam prinsip ini adalah sebagai berikut (Bapeten, 2013).

- a. Perlu diterapkan teknologi lain agar resiko yang ditimbulkan lebih rendah dibandingkan pemanfaatan tenaga nuklir yang sudah diterapkan sebelumnya
- b. Faktor ekonomi dan sosial
- c. Faktor kesehatan dan keselamatan
- d. Penerapan dalam pengelolaan limbah radioaktif

2. Limitasi

Dosis radiasi yang diterima oleh seseorang tidak boleh melebihi nilai batas dosis (NBD) yang sudah ditetapkan Bapeten dan berlaku untuk pekerja radiasi maupun masyarakat. Penerapan NBD dilakukan dengan pembagian daerah kerja, pemantauan paparan radiasi dan kontaminasi radioaktif pada daerah kerja. Nilai batas dosis (NBD) merupakan dosis terbesar yang sudah ditetapkan oleh Bapeten melalui peraturan kepala BAPETEN nomor 4 tahun 2013 ditetapkan dengan ketentuan:

- a. Dosis efektif rata-rata bagi pekerja radiasi adalah 20 mSv per tahun selama periode lima tahun. Total dosis yang terakumulasi tidak boleh lebih dari 100 mSv dalam periode 5 (lima) tahun yang ditetapkan dalam pasal 14 huruf a.
- b. Selama periode satu tahun, dosis efektif yang diterima sebesar 50 mSv
- c. Dosis ekivalen untuk lensa mata rata-rata sebesar 20 mSv per tahun pada periode lima tahun kemudian dosis ekivalen sebesar 50 mSv selama 1 tahun tertentu.
- d. Dosis ekivalen pada kulit sebesar 500 mSv per tahun.
- e. Dosis ekivalen untuk tangan atau kaki adalah 500 mSv per tahun (BAPETEN, 2013).
- f. Dosis efektif bagi anggota masyarakat yang sudah ditetapkan dalam pasal 14 huruf c adalah 1 mSv per tahun dengan dosis ekivalen untuk lensa mata adalah 15 mSv per tahun dan dosis ekivalen untuk kulit sebesar 50 mSv per tahun.

Pengawasan NBD dilakukan dengan penggunaan dosimeter perorangan TLD agar NBD tidak terlampaui, sehingga dilakukan

pemantauan yang meliputi paparan radiasi daerah kerja, pengaturan waktu kerja dan pengaturan pekerja radiasi (Batan, 2011).

3. Optimasi

Paparan yang diterima oleh pekerja radiasi dibuat serendah mungkin sesuai prinsip ALARA (*as low as reasonable of achievement*). Apabila komponen dalam program tersebut disusun dengan baik maka dapat dikatakan suatu program proteksi radiasi memenuhi asas optimasi (Batan, 2011). Optimasi yang diatur dalam pasal 10 mengenai proteksi dan keselamatan radiasi harus menetapkan adanya pembatasan dosis yang sesuai dengan tingkat panduan untuk paparan dalam bidang medik (BAPETEN, 2013).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada Februari sampai dengan Mei 2016 di ruang penyinaran Sinar-X Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder Pusat Teknologi Keselamatan Metrologi Radiasi (PTKMR) Kantor Pusat BATAN Mampang, Jakarta Selatan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

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

3.2.1 Alat

- Pesawat Sinar-X merek YXLON
- Dosimeter perorangan TLD buatan Harshaw dan Holder Tipe 8814
- Detektor *Ionization Chamber* 600 cc Model/No. Seri NE 2575C/576
- Elektrometer PTW UNIDOS Webline No. Seri 00268
- TLD Reader 6600 Buatan Harshaw USA
- Filter Aluminium
- Kolimator B4-40 (belakang) dan B3-80 (depan)
- Barometer
- Termometer
- Hygrometer
- Laser
- Meja Dudukan Fantom
- TLD Harshaw Reader
- 1 Set Komputer
- Kabel Penghubung

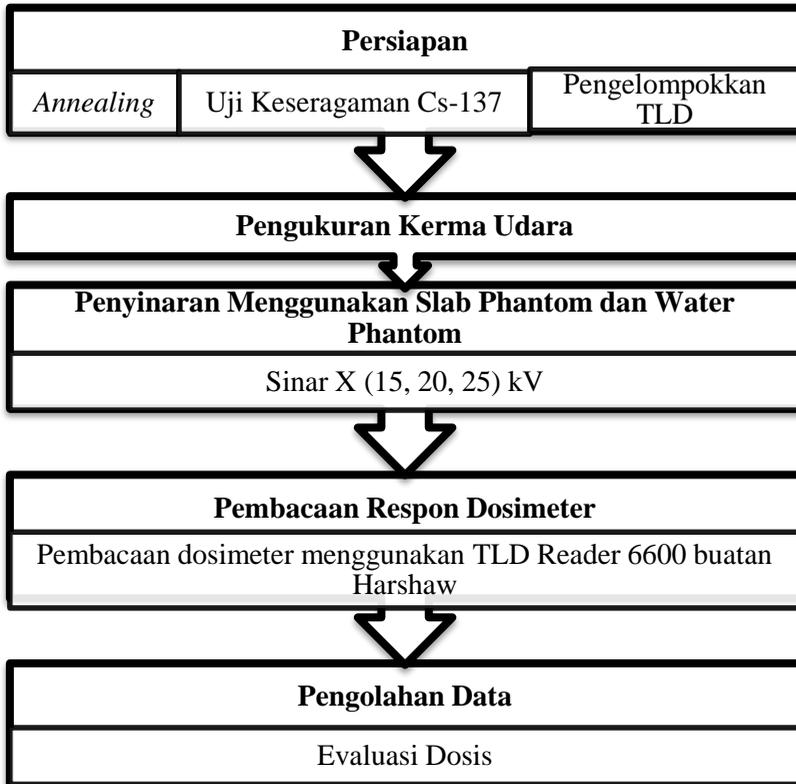
3.2.2 Bahan

- Sumber radioaktif Cs-137
- Water solid fantom PMMA ukuran 30 x 30 x 15 cm³
- Nitrogen kering (N₂)

Gambar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Lampiran 1

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian ini dilakukan berbagai tahap yaitu persiapan, penyinaran keseragaman, pengujian kerma, penyinaran sinar-x dan pembacaan respon dosimeter



3.3.1 Persiapan

1. *Annealing* TLD

Proses pemanasan (*Annealing*) adalah perlakuan termal yang digunakan untuk membuang informasi radiasi yang tersimpan dalam material. Material tersebut membutuhkan temperatur tinggi sebesar 300° C, kemudian diikuti temperatur yang rendah untuk material *Thermoluminence* (TL) LiF: Mg, Ti. Temperatur tinggi yang diberikan pada proses *annealing* digunakan untuk membersihkan *dosimetric traps* dari sinyal residu yang dapat menyebabkan cacahan latar belakang yang tidak diinginkan selama penggunaan dosimeter selanjutnya. Temperatur pemanasan yang rendah digunakan untuk menghilangkan radiasi atau menginduksi sinyal yang disebabkan karena termal selama penggunaan (Verdianto, 2012). Proses *annealing* dilakukan setiap selesai penyinaran radiasi dengan tujuan untuk meminimalkan respon dari TLD tersebut.

2. Penyinaran Keseragaman

Sebelum dilakukan pengelompokkan TLD, langkah yang harus dilakukan adalah uji keseragaman Cs 137. Pada uji keseragaman Cs 137, TLD diletakkan di permukaan depan phantom yang berupa water slab fantom. Dalam setiap penyinaran, TLD yang dipasang berjumlah 10 buah dengan menempatkan posisi TLD satu sama lain saling berdekatan yang bertujuan agar setiap dosimeter optimal mendekati dosis sebenarnya (Rofiq, 2006). Uji keseragaman dilakukan untuk mendapatkan variasi respon elemen TLD pada dosis radiasi yang sama dengan dosis yang diberikan adalah 1 mSv. Fantom sebagai tiruan tubuh manusia memiliki ukuran standar sebesar 30 x 30 x 15 cm³. Jarak yang dibutuhkan antara sumber dengan fantom sebesar 200 cm yang dinyatakan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Penyinaran keseragaman TLD Harshaw dengan model fisis berupa water solid fantom PMMA.

3. Pengelompokkan TLD

Pengelompokkan TLD didapatkan 20 buah dengan total 5 dosis yang akan disinari. Sehingga pada tiap dosis, dibutuhkan sebanyak 4 TLD yang nantinya akan disinari oleh pesawat sinar-X berdasarkan tegangan yang diberikan. Pada proses pengelompokkan ini dilakukan dengan SPC (*Statistic Process Control*) yaitu dengan memperhatikan *Upper Warning Limmit* (UWL), *Lower Warning Limmit* (LWL), *Upper Action Limmit* (UAL) dan *Lower Action Limmit* (LAL). Selama respon TLD masih berada pada UWL dan LWL maka TLD memiliki keseragaman yang dapat digunakan untuk penyinaran menggunakan pesawat sinar-X. Namun bila TLD berada di luar UWL dan LWL tapi masih berada di dalam UAL dan LAL maka harus dilakukan penyinaran ulang. Sedangkan jika TLD berada di luar UAL dan LAL, maka hal yang harus dilakukan adalah dengan tidak menggunakan TLD tersebut karena akan berpengaruh pada respon bacaan TLD pada saat dilakukan penyinaran terhadap sumber pesawat sinar-X .

4. Pengukuran Laju Kerma Udara Standar Sumber Radiasi Sinar-X

Pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber radiasi pesawat sinar-X dilakukan untuk variasi tegangan sebesar 15, 20,25 kV. Pengukuran laju kerma udara standar pesawat sinar-X dilakukan dengan pengaturan nilai tegangan tabung, arus, *Focus* (FoC) serta waktu penyinaran. Pengambilan data laju kerma dilakukan sebanyak

10 kali untuk masing-masing penyinaran selama 1 menit. Pada pengukuran ini, turut disertai pula pembacaan cacah latar belakang (*Background*), pembacaan temperatur, kelembaban udara dan tekanan sebagai faktor koreksi dari pengukuran.

Pengukuran detektor berupa nilai cacahan muatan listrik nano Coulomb selama satu menit (nC/menit). Faktor kalibrasi detektor tipe NE 2575 C volume 600cc ditunjukkan oleh Tabel 3.1

Tabel 3.1 Faktor kalibrasi detektor ionisasi tipe NE 2575C volume 600cc.

Tegangan tabung (kV)	Energi efektif (keV)	Faktor kalibrasi detektor Nk ($\mu\text{Gy/nC}$)
15	12,6	47,2
20	16,3	46,2
25	20,7	45,2

Hasil yang didapatkan dari pengukuran laju kerma tersebut dijadikan acuan untuk menghitung dosis ekuivalen kedalaman atau Hp(10). Hp(10) merupakan skala acuan yang digunakan untuk mengetahui berapa lama waktu penyinaran pada tiap-tiap dosis. Faktor konversi dibutuhkan dalam penentuan Hp(10), sehingga nilai faktor konversi yang dibutuhkan untuk masing-masing energi dari sinar-X ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Faktor konversi pada dosis ekuivalen kedalaman Hp(10).

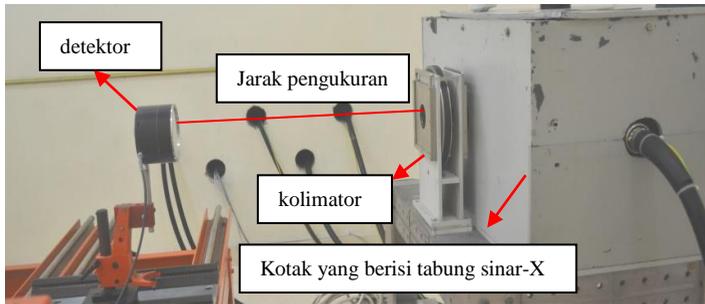
Tegangan tabung (kV)	Energi efektif (keV)	Faktor konversi Hp(10)/\dot{K}_u (Sv/Gy)
15	12,6	0,102
20	16,3	0,323
25	20,7	0,576

Penggunaan elektrometer dan kontrol panel pesawat sinar-X ditempatkan di ruang kontrol yang terpisah dengan ruang penyinaran sinar-X pada pengukuran kerma udara. Penggunaan elektrometer dan

kontrol panel pesawat sinar-X ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3



Gambar 3.2 Penggunaan elektrometer dan kontrol panel pesawat sinar-X di ruang kontrol.

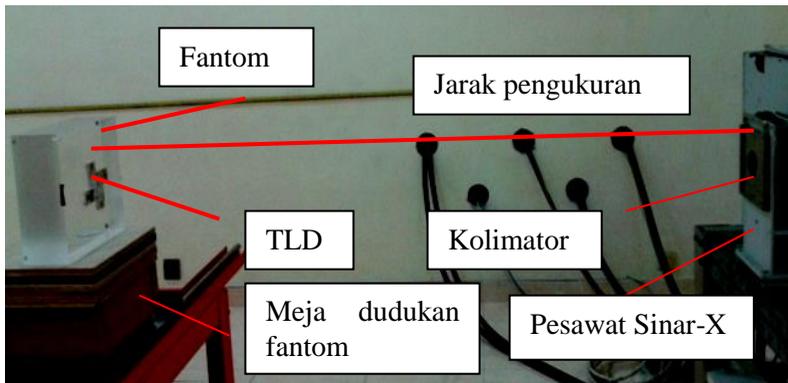


Gambar 3.3 Penentuan kerma menggunakan detektor di ruang penyinaran sinar-X.

5. Penyinaran Menggunakan Sinar-X

Penyinaran menggunakan sinar-X energi rendah dilakukan untuk variasi tegangan sebesar 15 kV, 20 kV dan 25 kV dengan 5 dosis yang digunakan masing-masing 0,1 mSv, 0,5 mSv, 1 mSv, 1,5 mSv dan 3 mSv. Dalam pengaplikasiannya, penyinaran ini terkait dengan lamanya waktu penyinaran. Dari penelitian ini, didapatkan bahwa semakin besar dosis yang diberikan maka semakin lama pula waktu penyinaran yang dibutuhkan. Pada penyinaran sinar-X untuk masing-masing dosis dibutuhkan 4 TLD. Sebelum TLD dipasang di permukaan depan fantom, terlebih dulu TLD disusun dengan memposisikan elemen 2 pada TLD berdekatan antara TLD yang satu

dengan TLD lainnya dan meletakkan TLD tepat berada di tengah fantom. Hal ini dikarenakan agar distribusi dari pancaran sinar-X dapat merata ke masing-masing TLD yang dipasang di permukaan depan fantom. Sehingga apabila distribusi dari pancaran sinar-X merata ke masing-masing TLD maka didapatkan hasil respon yang hampir seragam pada 4 TLD tersebut. Fantom yang digunakan pada penyinaran ini berukuran $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ dengan memperhitungkan laju dosis yang digunakan untuk menentukan waktu penyinaran pada tiap-tiap dosis yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Penyinaran TLD pada fantom dengan sumber radiasi pesawat sinar-X.

6. Pembacaan Respon TLD Harshaw

Pembacaan TLD dilakukan dengan suatu alat yang dinamakan TLD *Reader*. Dalam pembacaan TLD digunakan suatu alat yang dinamakan dengan TLD *Reader*. TLD diletakkan dalam sebuah *tray*. Kemudian dipanaskan dengan koil pemanas yang bersentuhan dengan TLD dan *tray*. Pada proses pembacaan TLD digunakan aliran gas nitrogen yang bertujuan untuk mengurangi sinyal yang dihasilkan dari pengotor dalam udara.

Pada pembacaan respon ini terdapat proses termoluminisensi dimana cahaya diemisikan dan melewati filter optik, selanjutnya melewati *Photon Multiplier Tube* (PMT) kemudian dari PMT cahaya tersebut diukur. Keluaran dari PMT sebanding dengan jumlah

foton yang dihasilkan. Output dari TLD reader memiliki satuan nC. Dalam pengoperasian TLD *reader* digunakan PC dengan software winREM dan hasil yang terukur disimpan dalam hard disk PC atau *print out*.

7. Pengolahan Data

7.1 Pengukuran Laju Kerma Standar

Pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber yang berasal dari pesawat sinar-X untuk variasi tegangan 15, 20, 25 kV. Hasil pengukuran detektor ionization chamber 600 cc ditampilkan pada elektrometer PTW UNIDOS Webline dalam bentuk cacahan muatan listrik (Coulomb) dan dikonversi menjadi kerma udara dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$K_u = M \times N_k \quad (11)$$

Keterangan :

K_u	:	Kerma udara ($\mu\text{Gy}/\text{menit}$)
M	:	Hasil pengukuran (nC/menit)
N_k	:	Faktor kalibrasi detektor ($\mu\text{Gy}/\text{nC}$)

Penentuan faktor kalibrasi mengacu pada kondisi yang digunakan di laboratorium standar.

Koreksi untuk densitas udara (K_{PT}) adalah suatu koreksi yang dipakai dalam pengukuran kerma udara akibat perubahan tekanan udara (P) dan temperatur (T)

$$K_{PT} = \frac{(273,2+T)}{(273,2+T_0)} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (12)$$

Keterangan :

K_{PT} : Koreksi densitas udara ($\mu\text{Gy}/\text{menit}$)

P_0 : Tekanan acuan, $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$

T_0 : Temperatur acuan, $T_0 = 20^\circ\text{C}$

P : Tekanan yang terukur pada penyinaran pada satu Dosis

Jika rentang kelembaban antara 30-80% maka koreksi diabaikan.

7.2 Penentuan Laju Dosis

Dalam penentuan dosis ekivalen perorangan digunakan nilai besaran kerma udara sebagai nilai kerma standar yang telah didapatkan dari pengukuran sebelumnya, besaran kerma udara dapat dikonversi menjadi besaran dosis ekivalen perorangan Hp(10) dengan menggunakan persamaan.

$$H_p(10) = K_u \times F_{konversi} \quad (13)$$

Keterangan :

$H_p(10)$: Dosis Ekivalen Perorangan ($\mu\text{Sv}/\text{menit}$)

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

$F_{konversi}$: Faktor konversi Hp(10)/Ku ($\mu\text{Sv}/\mu\text{Gy}$)

7.3 Penentuan Waktu Penyinaran

Lama penyinaran merupakan hal yang penting dalam penyinaran. Waktu penyinaran pada tiap dosis berbeda-beda. Dalam menentukan lamanya penyinaran, dosis ekivalen perorangan Hp (10) perlu dikonversi dari μSv menjadi mSv . Persamaan yang digunakan pada penentuan waktu penyinaran adalah:

$$\text{lama penyinaran} = \frac{\text{dosis yang diinginkan (mSv)}}{HP(10)} \quad (14)$$

7.4 Pembuatan Kurva Kalibrasi Sinar-X Energi Rendah

Respon bacaan TLD pada kurva kalibrasi dinyatakan dalam sumbu y dan variasi dosis dinyatakan pada sumbu x, kurva kalibrasi diperoleh dari hubungan yang linear antara respon bacaan dengan variasi dosis. Persamaan yang didapat untuk kurva kalibrasi adalah:

$$y = ax \pm b \quad (15)$$

7.5 Pembuatan Kurva Terompet

Kurva terompet digunakan untuk menguji kurva kalibrasi, dianggap sesuai apabila data pengukuran tidak keluar dari batas atas dan batas bawah pada grafik berbentuk terompet yang telah ditetapkan oleh Eurados dan IAEA

EURADOS 1999

$$\frac{1}{1,5} \left(1 - \frac{2D_0}{D_T} \right) \leq \frac{D_M}{D_T} \leq 1,5 \left(1 + \frac{D_0}{2D_0 + D_T} \right) \quad (16)$$

IAEA 2007

$$\frac{1}{1,5} \left(1 - \frac{2D_0}{D_T} \right) \leq \frac{D_M}{D_T} \leq 2 \quad (17)$$

7.6 Penentuan Ketidakpastian Kalibrasi

Ketidakpastian pengukuran dapat diklasifikasikan menurut metode yang digunakan, ketidakpastian digolongkan menjadi ketidakpastian tipe A dan ketidakpastian tipe B. Evaluasi ketidakpastian tipe A dengan cara analisis statistik dari pengamatan, ketidakpastian tipe A terdapat banyak komponen yang dihitung, contohnya adalah ketidakpastian alat baca, ketidakpastian dari keseragaman TLD, ketidakpastian simpangan dosis pengukuran TLD dengan dosis yang sebenarnya. Sehingga hasil ketidakpastian lebih besar didapatkan pada ketidakpastian tipe A. Evaluasi ketidakpastian tipe B didapatkan dari referensi yang meliputi data pengukuran sebelumnya, karakteristik dari instrumen dan bahan, spesifikasi pabrik, data dari sertifikat standar atau dari laporan lainnya (KAN, 2003).

Ketidakpastian tipe A ditunjukkan dengan adanya data pengukuran, selanjutnya pada data tersebut akan didapatkan nilai rata-rata dan standar deviasi. Persamaan ketidakpastian untuk tipe A adalah :

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

dimana :

σ = standar deviasi

n = banyaknya TLD dalam setiap pengukuran

7.6.1 Ketidakpastian Kombinasi (U_c)

Ketidakpastian tipe A dan tipe B perlu dikombinasikan untuk memberikan gambaran tentang ketidakpastian dari hasil kalibrasi tersebut. Persamaan ketidakpastian kombinasi adalah :

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (19)$$

7.6.2 Ketidakpastian Diperluas (U_{exp})

Ketidakpastian hasil pengukuran yang dilaporkan mencakup sebagian besar distribusi nilai, faktor cakupan k bernilai 2 dari tingkat kepercayaan (*confidence level*) sebesar 95%. Rumus ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*) adalah :

$$U_{exp} = k \times U_c \quad (20)$$

dimana :

U_{exp} = ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*)

k = faktor cakupan (*coverage factor*)

U_c = ketidakpastian kombinasi (*combined uncertainty*)

7.6.3 Ketidakpastian Resolusi (U_{res})

Ketidakpastian resolusi berhubungan dengan ketidakpastian alat. Ketidakpastian resolusi mengacu pada dosis yang paling rendah pada pengukuran ini dan rata-rata respon (\bar{x}) dari 4 dosimeter TLD LiF-700. Ketidakpastian resolusi (U_{res}) diperoleh dari persamaan

$$U_{res} = \frac{\text{cacahan terkecil}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (21)$$

7.6.4 Ketidakpastian Daya Guna

Nilai simpangan terhadap dosis teori (Bias) dijadikan acuan guna didapatkan nilai ketidakpastian daya guna, persamaan dari Bias (P) adalah

$$\text{Bias (P)} = \frac{(D_m - D_T)}{D_T} \times 100 \quad (22)$$

dimana :

D_T = dosis penyinaran yang diberikan

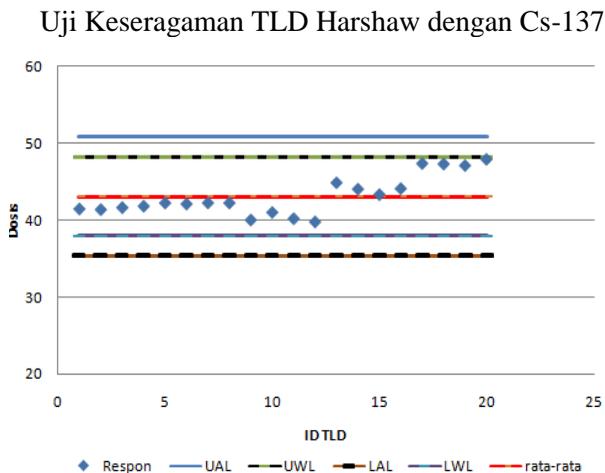
D_m = dosis yang didapat dengan memasukkan nilai respon bacaan TLD ke persamaan kurva kalibrasi pada masing-masing tegangan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Keseragaman TLD Harshaw

Sebelum TLD disinari menggunakan sinar-X, terlebih dulu TLD yang sudah disiapkan diuji keseragamannya dengan menggunakan Cs-137 dan waktu yang diberikan sebesar 7 menit 5 detik. Pada uji keseragaman, TLD yang dipasang sebanyak 10 buah pada water solid fantom. Dalam penelitian ini, penulis telah mempersiapkan TLD sebanyak 30 buah sehingga pada saat uji keseragaman terdapat 3 kali tahapan. Setelah TLD telah diuji keseragaman, maka langkah selanjutnya adalah membaca TLD untuk mengetahui hasil respon bacaan dan meng-annealing TLD dengan tujuan untuk meminimalkan elektron yang berada di dalam perangkat (*trap*). Dari pembacaan respon TLD, penulis dapat mengelompokkan TLD sesuai hasil bacaan. Dimana dalam pengelompokkan harus diseragamkan respon bacaan antar TLD yng ditunjukkan pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Keseragaman TLD Harshaw menggunakan sumber radioaktif Cs-137.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa TLD yang berjumlah 20 buah dapat digunakan seluruhnya karena TLD tersebut masih berada di dalam batasan UWL dan LWL. Dengan standart deviasi yang diperoleh dari 20 TLD ini adalah sebesar 6 % sehingga TLD tersebut dapat dikategorikan memiliki keseragaman respon berdasarkan acuan dari Tawil (1993) yang menyatakan bahwa standart deviasi sebesar $\pm 9\%$. Uji keseragaman pada TLD perlu dilakukan agar dapat mengelompokkan beberapa TLD yang memiliki respon hampir seragam, dengan pengelompokkan tersebut dapat dijadikan acuan bagi penulis untuk penyinaran dengan menggunakan sinar-X.

4.2 Perhitungan Kerma

Sebelum menuju ke tahap penyinaran menggunakan pesawat sinar-X, terlebih dahulu dilakukan pengujian Kerma. Pengujian kerma dilakukan setiap masing-masing range energi dengan tegangan 15-25 kV. Dalam pengujian kerma digunakan elektrometer PTW Unidos Webline No. Seri 00268 dan memperhatikan nilai tekanan(p), suhu (T), dan kelembaban (RH) yang mempengaruhi nilai kerapatan udara. kemudian diukur nilai cacahan sebanyak 10 kali. Setelah nilai cacahan (M) didapatkan maka dapat digunakan untuk mencari nilai koreksi tekanan dan suhu (Kpt) yang kemudian dikalikan dengan nilai cacahan. Setelah didapatkan nilai dari hubungan antara cacahan dengan nilai koreksi tekanan suhu (Kpt) maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai rata-rata dan standar deviasi. Dari nilai cacahan yang sudah dirata-rata maka dapat menentukan nilai kerma, standar deviasi yang sudah didapat juga dapat menentukan ketidakpastian. Pada tegangan 15 kV terdapat variasi nilai cacahan yang bertujuan untuk menguji keakuratan data kerma. Satuan dari nilai cacahan adalah nano Coulomb (nC). Data kerma yang didapat pada pengujian untuk tegangan 15 kV memiliki fluktuasi yang naik turun pada nilai cacahannya, rata-rata nilai cacahan yang diperoleh sebesar 5,57 nC dengan standar deviasi yang didapat sebesar 0,00319. Tekanan (p) pada range energi 15 kV sebesar 100,7 kPa dengan suhu 19,78⁰ C dan kelembaban yang diberikan sebesar 58 %. Nilai cacahan (M) merupakan hasil pengurangan dari M rata-rata dengan M *background* yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengukuran kerma pada tegangan 15 kV.

SDD (cm)	M (nC/menit)	Ku (μ Gy/menit)	Hp (10) (μ Sv/menit)
200	5,56	262,62	15,76

Pengujian kerma untuk data 20 kV, besar tekanan yang dimiliki adalah 101,1 kPa dengan suhu 19,77⁰C dan kelembaban yang diukur sebesar 55%. Rata-rata cacahan yang didapat dari energi 20 kV adalah 9,47702 nC, dimana nilai tersebut sudah dikalikan dengan nilai koreksi tekanan dan suhu yang bernilai 1,001439. Standar deviasi yang didapat adalah 0,02015. Kerma udara tegangan 20 kV ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pengukuran kerma pada tegangan 20 kV.

SDD (cm)	M (nC/menit)	Ku (μ Gy/menit)	Hp (10) (μ Sv/menit)
200	9,48	437,76	118,19

Data pengujian kerma untuk range energi 25 kV, rata-rata nilai cacahan yang didapat sebesar 6,7143 nC pada tekanan 100,8 kPa dengan suhu 19,73⁰C dan kelembaban yang diukur sebesar 54%. Standar deviasi yang didapat pada data ini sebesar 0,00515. Kerma udara tegangan 20 kV ditunjukkan pada Tabel 4.3.

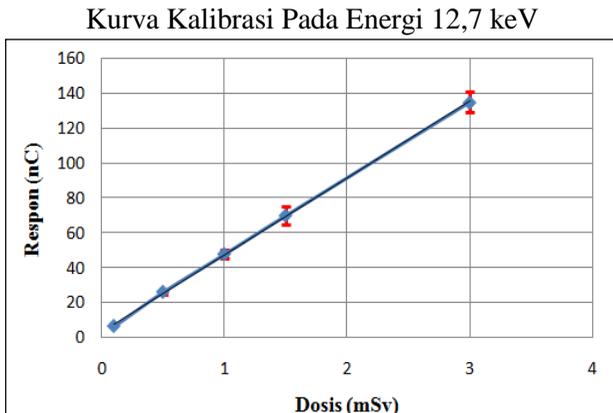
Tabel 4.3 Pengukuran Kerma Pada Tegangan 25 kV.

SDD (cm)	M (nC/menit)	Ku (μ Gy/menit)	Hp (10) (μ Sv/menit)
200	6,71	303,43	166,88

Pengujian kerma yang telah dilakukan dapat dijadikan acuan untuk mengetahui berapa besar dosis ekuivalen yang diterima pekerja radiasi. Perhitungan Hp(10) berdasarkan nilai faktor konversi dari masing-masing tegangan yang ditetapkan pada ISO-4037.

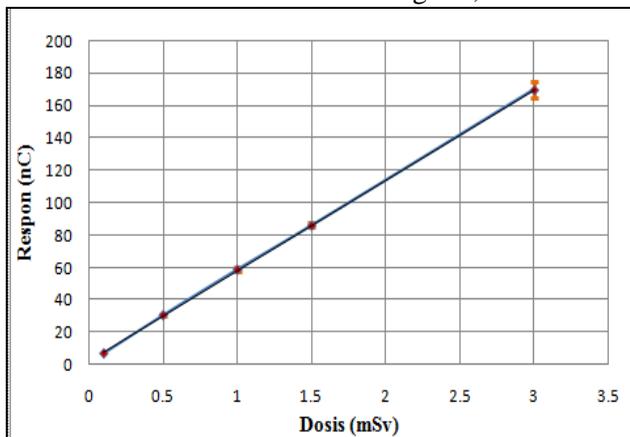
4.3 Kurva Kalibrasi

Setelah dilakukan penyinaran terhadap sumber pesawat sinar-X untuk energi rendah dengan 5 variasi dosis pada jarak 200 cm maka diperoleh kurva kalibrasi sesuai dengan respon bacaan TLD. Berikut ini adalah kurva kalibrasi pada energi 12,7 keV, 16,5 keV, dan 20,4 keV yang ditunjukkan dalam Gambar 4.2, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 disertai dengan faktor ralat.



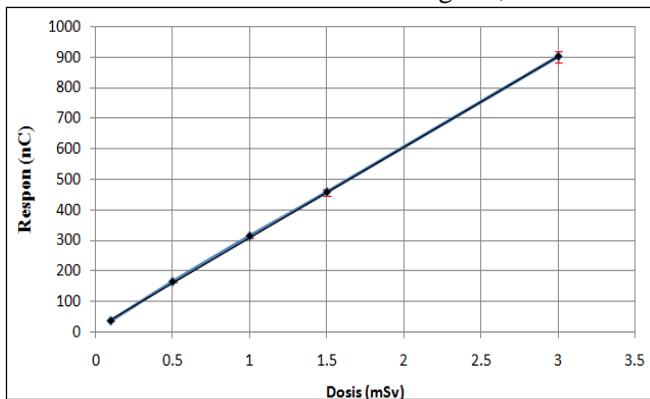
Gambar 4.2 Kurva kalibrasi TLD Harshaw pada energi 12,7 keV dengan variasi dosis.

Kurva Kalibrasi Pada Energi 16,5 keV



Gambar 4.3 Kurva kalibrasi TLD Harshaw pada energi 16,5 keV dengan variasi dosis.

Kurva Kalibrasi Pada Energi 20,4 keV



Gambar 4.4 Kurva kalibrasi TLD Harshaw pada energi 20,4 keV dengan variasi dosis.

Gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 menunjukkan hubungan antara respon TLD sebagai sumbu (y) dengan variasi dosis sebagai sumbu (x). Terlihat bahwa hubungan antara dosis dengan respon yang berbanding lurus, jika semakin besar dosis dan energi yang diberikan maka semakin besar pula respon yang didapat, begitu pula

sebaliknya jika dosis dan energi makin kecil maka respon yang didapat juga semakin kecil. Hal ini dikarenakan radiasi memberikan energi pada elektron. Menurut (Rahma, 2015), semakin besar dosis dan energi yang diberikan maka semakin besar pula respon dari TLD, sehingga dapat dinyatakan bahwa kurva kalibrasi cukup sesuai. Dari kurva kalibrasi tersebut didapatkan nilai regresi untuk data 12,7 keV sebesar 0,9997 dengan persamaan kurva kalibrasi adalah $y = 0,0227x - 0,0775$. Kemudian diperoleh nilai regresi untuk energi 16,5 keV sebesar 0,9999 dan persamaan kurva kalibrasi yang didapat adalah $y = 0,0179x - 0,0452$ dan untuk energi 20,4 keV didapatkan nilai regresi sebesar 0,9998 dengan persamaan kurva kalibrasi $y = 296,73x + 12,264$. Dari ketiga data yang diperoleh pada kurva ini, terlihat bahwa data tersebut memiliki keakuratan yang tinggi karena nilai yang diperoleh hampir mendekati satu. Pada kurva tersebut, terlihat bahwa pada energi 16,5 keV nilai regresi yang dimiliki hampir mendekati satu dibandingkan dengan energi 12,7 keV dan 20,4 keV. Dinyatakan pula pergerakan dari grafik ini sangat linear, terlihat bahwa bacaan respon dari dosis yang terkecil hingga dosis yang terbesar mengalami peningkatan. Kurva kalibrasi yang ditunjukkan pada gambar diatas dengan masing-masing energi memiliki kecenderungan dengan semakin besarnya energi maka semakin besar pula respon yang didapat. Hal ini didukung pula oleh penelitian dari (Bakshi, 2009).

Pengujian kurva kalibrasi untuk sinar-X ini juga dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah peletakkan posisi dari TLD. Hal ini begitu penting karena pada saat empat TLD disusun dan diletakkan pada fantom, berkas sinar-X harus tegak lurus atau tepat berada di pusat (*center*) dari keempat TLD tersebut, apabila berkas sinar tidak sesuai dengan posisi yang dimaksud maka hal yang dilakukan adalah dengan menggeser meja dudukan fantom agar posisi yang diinginkan sesuai. Pengaruh lain yang timbul dalam pengujian kurva kalibrasi adalah keseragaman dari TLD yang akan diuji, apabila TLD yang digunakan memiliki bacaan respon yang hampir seragam maka kurva yang didapat akan semakin baik nilainya. Faktor *fading* dari TLD juga berpengaruh pada bacaan respon yang didapat, *fading* (pemudaran) dapat terjadi karena jangka waktu yang relatif lama antara terjadinya penyinaran dan pembacaan respon intensitas Termoluminesensi (TL) , sehingga banyak elektron

yang terlepas dari perangkat. Peristiwa ini dinamakan dengan pemudaran yang menyebabkan berkurangnya bacaan respon dari dosimeter terhadap radiasi yang diterimanya. Faktor *fading* dapat menyebabkan bacaan respon intensitas TL yang diperoleh lebih rendah dibandingkan energi radiasi sebenarnya yang diterima oleh dosimeter. TLD buatan Harshaw memiliki faktor *fading* sebesar $\pm 5\%$ dalam 3 bulan (Rofiq, 2006). Sehingga setelah pemakaian TLD selama 3 bulan, perlu dilakukan *annealing* ulang untuk memperoleh bacaan respon dosimeter sesuai dengan energi radiasi yang diterimanya. Faktor ralat pada penelitian ini memiliki pengaruh kecil, hal ini dapat dibuktikan dari ralat yang ditunjukkan dalam tiap-tiap dosis. Penentuan faktor ralat didasarkan pada bacaan respon yang didapat dari masing-masing TLD yang disusun pada permukaan depan fantom. Kemudian dari hasil bacaan respon yang didapat, diketahui besarnya standart deviasi (stdev) dan nilai stdev dijadikan acuan untuk menentukan faktor ralat dari penelitian ini.

4.4 Distribusi Radiasi Sinar-X Terhadap Dosimeter TLD

Elemen dua pada dosimeter TLD Harshaw lebih sensitif terhadap radiasi sinar-X, sehingga dalam peletakkan keempat TLD perlu diperhatikan agar elemen dua pada TLD diletakkan sesuai dengan diameter lapangan radiasi yang berukuran 20,6 cm, sehingga distribusi radiasi sinar-X dapat diterima secara merata oleh masing-masing TLD. Dosimeter TLD yang diletakkan pada fantom ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Peletakkan TLD Harshaw pada permukaan depan fantom.

Peletakkan dosimeter TLD pada fantom berperan penting untuk mengetahui distribusi radiasi sinar-X yang diterima oleh keempat TLD dengan variasi dosis pada tegangan yang berbeda dan digambarkan melalui Tabel 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 dan 4.8.

Tabel 4.4 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 3 mSv.

Dosis	Posisi	ID TLD	Cacahan (nC)		
			15 kV	20 kV	25kV
3 mSv	Kanan atas	1002955	136,37	173,83	887,42
	Kanan bawah	1002925	126,86	164,80	924,69
	Kiri atas	1001783	139,23	173,96	909,3
	Kiri bawah	1002089	138,39	166,97	880,75
Rata-rata			135,21	169,89	900,54

Tabel 4.5 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 1,5 mSv.

Dosis	Posisi	ID TLD	Cacahan (nC)		
			15 kV	20 kV	25kV
1,5 mSv	Kanan atas	1001761	67,91	87,53	468,79
	Kanan bawah	1000255	70,76	84,38	443,86
	Kiri atas	1002111	64,87	86,03	462,35
	Kiri bawah	1002995	77,11	86,78	455,32
Rata-rata			70,16	86,18	457,58

Tabel 4.6 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 1 mSv.

Dosis	Posisi	ID TLD	Cacahan (nC)		
			15 kV	20 kV	25kV
1 mSv	Kanan atas	1000458	48,03	58,16	305,10
	Kanan bawah	1002969	44,85	58,11	319,56
	Kiri atas	1000614	49,16	59,76	313,43
	Kiri bawah	1001129	49,91	60,05	315,64
Rata-rata			47,99	59,02	313,43

Tabel 4.7 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 0,5 mSv.

Dosis	Posisi	ID TLD	Cacahan (nC)		
			15 kV	20 kV	25kV
0,5 mSv	Kanan atas	1002830	25,59	30,39	163,78
	Kanan bawah	1000636	24,95	31,60	166,82
	Kiri atas	1000954	26,67	30,49	164,30
	Kiri bawah	1001801	27,85	31,10	160,04
Rata-rata			26,26	30,90	163,74

Tabel 4.8 Penyebaran radiasi sinar-X pada dosis 0,1 mSv.

Dosis	Posisi	ID TLD	Cacahan (nC)		
			15 kV	20 kV	25kV
0,1 mSv	Kanan atas	2017531	6,46	7,56	36,24
	Kanan bawah	2017529	6,56	7,40	35,59
	Kiri atas	1002950	6,55	7,20	35,90
	Kiri bawah	2017521	6,71	7,29	36,58
Rata-rata			6,57	7,36	36,08

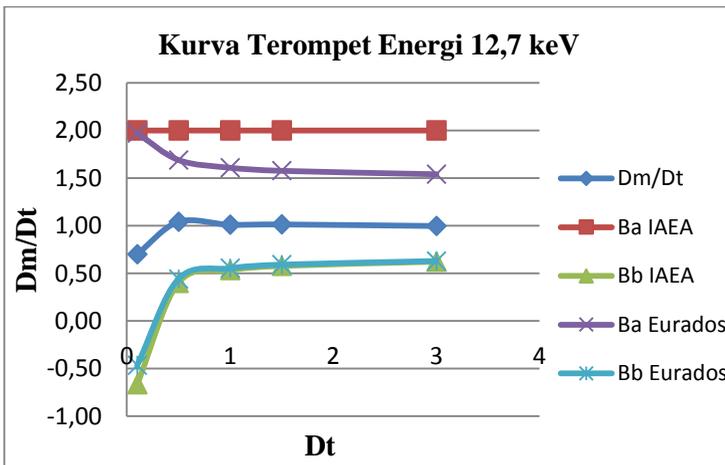
Dari Tabel 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 dan 4.8, penyebaran radiasi dari sinar-X yang mengenai dosimeter TLD pada permukaan depan fantom cenderung merata dalam hal pendistribusiannya. Namun ada beberapa posisi dari TLD yang cenderung lebih tinggi maupun lebih rendah respon bacaannya dari TLD yang lain. Hal ini bisa disebabkan karena peletakkan posisi TLD pada fantom kurang presisi. Peletakkan dosimeter TLD di permukaan depan fantom harus tegak lurus dengan berkas sinar-X, dalam hal ini bisa dilakukan pengaturan terhadap pengatur berkas (kolimator). Iluminans (kuat cahaya) dari lampu kolimator juga harus terlihat jelas agar luas lapangan penyinaran bisa diidentifikasi ketika akan dilakukan penyinaran. Pengaruh lain yang mengakibatkan pendistribusian radiasi sinar-X tidak merata adalah karena proses *annealing* pada masing-masing TLD, *annealing* adalah proses untuk membuang informasi radiasi yang tersimpan dalam TLD atau meminimalkan elektron yang berada di dalam perangkap (*trap*) dan proses *annealing* dilakukan sebelum penyinaran. Ketika *annealing* sudah dilakukan maka dihasilkan bacaan respon dari TLD, respon TLD yang terbaca berbeda-beda antar satu sama lain sehingga akan

berpengaruh ketika TLD tersebut disinari dengan sinar-X karena tentunya akan didapatkan respon bacaan yang berbeda pula atau terdapat variasi respon bacaan TLD.

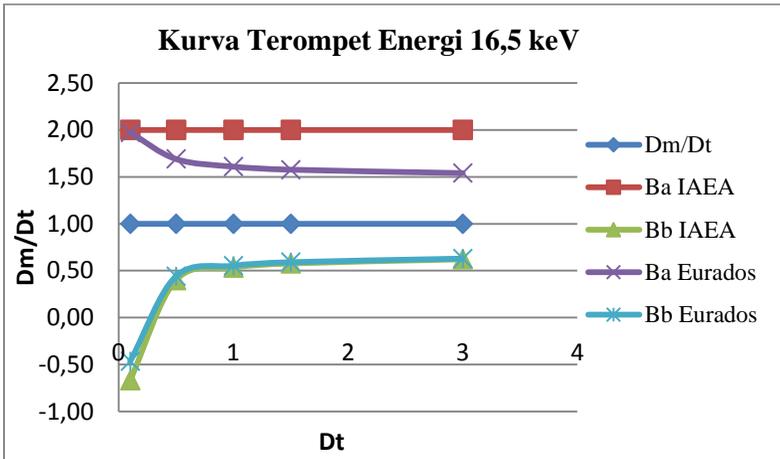
4.5 Kurva Terompet

Setiap kurva kalibrasi yang telah dibuat maka perlu diuji dengan menggunakan standar IAEA dan Eurados. Standar IAEA dan Eurados telah ditetapkan sebagai kurva toleransi untuk kurva terompet, dinamakan kurva terompet karena bentuknya mirip dengan terompet. Perbandingan antara dosis pengukuran (*measurement dose* (Dm)) dengan dosis sebenarnya (*True Dose* (Dt)) dinyatakan dalam sumbu y. Dosis sebenarnya dinyatakan dalam sumbu x. Kurva terompet menunjukkan batas atas dan batas bawah sebagai batasan terhadap kurva kalibrasi, batas atas pada kurva ini menunjukkan batas maksimal tanggapan dosis hasil pengukuran TLD dengan dosis sebenarnya, sedangkan batas bawah adalah batas minimal tanggapan dosis pengukuran TLD dengan nilai sebenarnya.

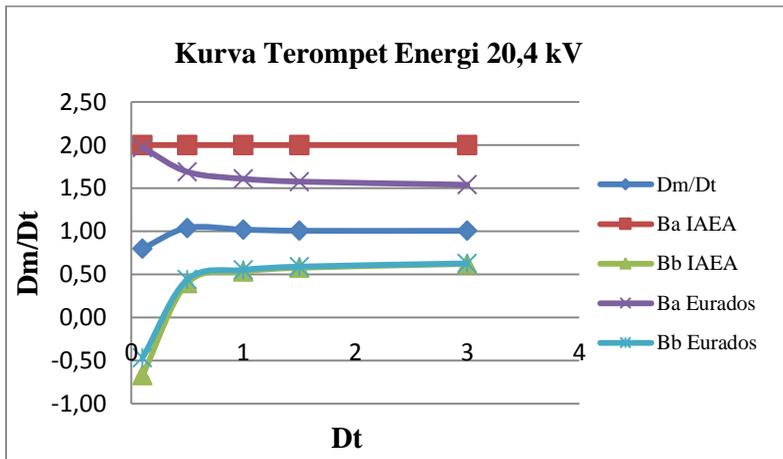
Kurva terompet pada energi 12,7 keV, 16,5 keV, dan 20,4 keV ditunjukkan oleh Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 dengan Ba adalah batas atas dan Bb adalah batas bawah.



Gambar 4.6 Kurva terompet pada energi 12,7 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.



Gambar 4.7 Kurva terompet pada energi 16,5 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.



Gambar 4.8 Kurva terompet pada energi 20,4 keV sesuai standar IAEA dan Eurados.

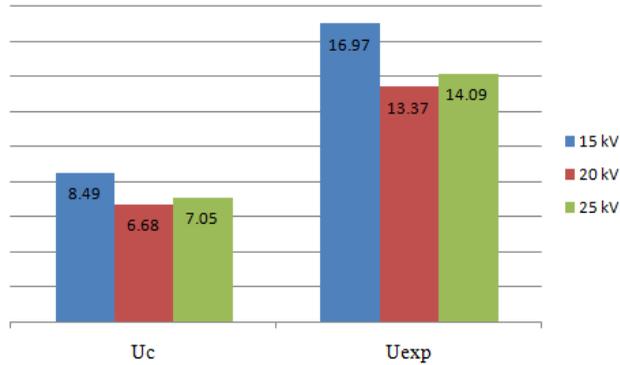
Secara keseluruhan hasil perhitungan dosis masih berada dalam batas maksimal dari standar IAEA maupun Eurados. Kriteria ketelitian yang direkomendasikan oleh *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) adalah terpenuhinya faktor

perbandingan antara dosis terukur dengan dosis sebenarnya. Kriteria ini dapat dibuktikan dari kurva terompet, dimana kurva terompet merupakan perbandingan antara dosis terukur dengan dosis sebenarnya versus fungsi dosis. Faktor perbandingan antara dosis terukur dengan dosis sebenarnya pada kurva terompet dari hasil penelitian yang sudah dilakukan didapatkan nilai 0,6 sampai 1,5 dan perbandingan dosis terukur dengan dosis sebenarnya sebesar 1 dengan faktor kesalahan yang dimiliki pada kurva terompet ini berkisar pada nilai 0% sampai dengan 30%.

Data pada penelitian ini cukup sesuai dengan hasil yang didapat dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan faktor perbandingan yang dimiliki berada pada nilai 0,67 dengan batas tertinggi dari kurva ini adalah 1,5 dengan nilai yang sempurna (ideal) untuk perbandingan antara dosis yang terukur dengan dosis sebenarnya adalah 1. Faktor kesalahan maksimal dalam kurva terompet untuk pengukuran dosis perorangan sebesar -33% sampai 50 % (Elfida, 2005). Sehingga dari beberapa uraian tersebut, dapat dinyatakan bahwa data pada kurva terompet bisa digunakan untuk kurva kalibrasi dosimeter perorangan.

4.6 Ketidakpastian Kurva Kalibrasi

Hal yang perlu diperhatikan dalam penentuan ketidakpastian adalah tanggapan TLD, ketidakpastian resolusi, ketidakpastian irradiasi, bias (S) dan ketidakpastian fading. Ketidakpastian tipe A (U_A) didapatkan dari pengukuran, contohnya adalah ketidakpastian keseragaman TLD, ketidakpastian simpangan hasil pengukuran. Solusi dari ketidakpastian tipe A adalah dengan cara jumlah dosimeter perorangan dapat dikurangi maupun ditambahkan. Ketidakpastian tipe B didapatkan dari ketidakpastian background, ketidakpastian irradiasi TLD (U_{irr}), dan ketidakpastian fading (U_{fad}). Setelah ketidakpastian tipe A dan tipe B telah ditentukan maka dapat dijadikan acuan untuk memperoleh ketidakpastian gabungan (U_c) (KAN, 2003). Berikut ini adalah ketidakpastian yang diperoleh dari kurva kalibrasi dengan memperhatikan ketidakpastian gabungan yang dinyatakan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Ketidakpastian gabungan (U_c) dan ketidakpastian bentangan (U_{exp}) kurva kalibrasi.

Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa pada tegangan 15 kV yang setara dengan energi 12,7 keV didapatkan nilai U_c sebesar 8,49%, tegangan 20 kV atau energi 16,5 keV bernilai 6,68% dan tegangan 7,05 kV atau energi 20,4 keV bernilai 7,05%. Dari data yang didapat, dapat dinyatakan bahwa hasil ketidakpastian yang diperoleh dari penelitian ini berada dalam batas toleransi yang telah ditetapkan oleh IAEA. Berdasarkan IAEA (1999), ketidakpastian gabungan untuk dosimeter TLD dengan dosis $Hp(0,07)$ dan $Hp(10)$ adalah 42%. Sehingga data penelitian ini dapat digunakan untuk proses evaluasi dosis pada radiasi sinar-X energi rendah. Ketidakpastian bentangan (U_{exp}) pada masing-masing data tegangan dari penelitian ini juga dikatakan mewakili batas toleransi yang telah ditetapkan oleh KAN (Komite Akreditasi Nasional), dimana ketidakpastian bentangan mencakup sebagian besar distribusi nilai dengan besar nilai sebesar 95% (KAN, 2003).

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Disimpulkan bahwa kurva kalibrasi pada energi 12,7 keV, 16,5 keV dan 20,4 keV terhadap sinar-X energi rendah memiliki tanggapan yang linier dengan energi 20,4 keV memiliki tingkat sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan energi yang lain. Kurva kalibrasi ini dinyatakan baik karena data pada kurva tersebut berada di dalam batas yang telah ditentukan oleh IAEA maupun Eurados pada kurva terompet, selain itu faktor kesalahan yang dimiliki sesuai dengan yang direkomendasikan oleh ICRP. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kurva ini cukup baik dan bisa dijadikan acuan untuk pengguna di lapangan kerja namun harus dikalibrasi sesuai dengan energi radiasi yang digunakan.

5.2 Saran

Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan pengamatan respon dosimeter perorangan TLD Harshaw terhadap fungsi sudut.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi. (2006). *Analisis Unsur Kelumit Melalui Pancaran Sinar-X Karakteristik*. Jakarta: Batan.
- Amsori. (2009). *Pengaruh Kemiringan Sudut Gantri Pada Dosis Permukaan Fantom Berkas Radiasi Gamma Cobalt*. Jakarta: UI
- Arezki, B. (2016). *X-Ray Fluorescence: Energy Dispersy Analysis (EDXRF)*.
- Bahri, S. (2005). *Variasi tegangan pemercepat terhadap spektrum sinar-X untuk absorber Cu dan Al*. Bengkulu: Universitas Bengkulu.
- BAPETEN. (2013). *Proteksi Dan Keselamatan Radiasi*. Jakarta: BAPETEN.
- Bueche, F., & Hecht, E. (2006). *Schaum's Outline of College Physics*. USA: McGraw-Hill.
- Cember, H., & Jhonson, T. (2009). *Introduction to Health Physics*. New York: Mc Graw Hill.
- CNSC. (2012). *Introduction to Radiation*. Canada: CNSC.
- Connolly. (2012). *The Interaction of X-rays with Matter and Radiation Safety*. Spring.
- Daryoko M, Z. S. (2003). *Aplikasi Jaminan Kualitas Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Jakarta: Batan.
- Elfida, S. W. (2005). *Interkomparasi Tld Bg-0110 Sebagai Dosimeter Perorangan*. Jakarta: BATAN.
- Hilmy, N. (1995). *Manfaat Radiasi Dalam Industri, Lingkungan*. Jakarta: Pair.
- IAEA. (2000). *Calibration Of Radiation Protection Monitoring Instrument*. Vienna: Safety Report Series.
- 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 4*. Vienna.
- KAN. (2003). *Pedoman Evaluasi dan Pelaporan Ketidapastian Pengukuran*. Jakarta: Komite Akreditasi Nasional.
- Kartikasari, D., & Hiswara, E. (2015). *Dosis Pasien Pada Pemeriksaan Rutin Sinar-X Radiologi Diagnostik*. Jakarta: BATAN.

- Kusumawati, & Hasnel. (2012). *Perbandingan Tanggapan Dosimeter Termoluminisensi*. Jakarta: Batan.
- Lusiyanti Y, Z. A. (2001). *Efek Kesehatan Radiasi Non Pengion Pada Manusia*. Jakarta: BATAN.
- Nazaroh, & Fendinugroho. (2010). *Komparasi Pengukuran Laju Kerma Udara*. Yogyakarta: Batan.
- NCRP. (1993). *Risk Estimates for Radiation Protection*. Maryland: NCRP.
- Noerwasana, A. D. (2010). *Analisis Sebaran Radiasi Hambur Dari Pasien Pada Pesawat Fluoroskopi Dengan Metode Monte Carlo dan Pengukuran*. Jakarta: UI.
- PNNL. (2010). *Hanford External Dosimetry*. USA: Pacific Northwest National Laboratory.
- PP. (2000). *Peraturan Pemerintah No. 63 Tahun 2000 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif*. Jakarta.
- PTW. (2012). *PTW Water Phantom System*. Freiburg: PTW Freiburg.
- Rahma, R. (2015). *Cacahan Thermoluminescent Dosimeter Terhadap Medan Radiasi Campuran Beta Gamma*. Malang: UB.
- Rofiq, Nina, & Bambang. (2006). *Dosimeter Cas04: Dy Buatan Barc Sebagai Pemantau Dosis Radiasi*. Jakarta : BATAN
- Sari, S. (2012). *The Interaction of X-rays with Matter and Radiation Safety*. Jakarta: UI.
- Sofyan, H. (2012). *Dosimeter Thermo Luminesensi sebagai Dosimetri Personal dalam Pemantauan Dosis Radiasi Eksternal*. Jakarta: UI
- Suliman. (2011). *Calibration of Working Standard Ionization Chambers and Dose Standardization*. Sudan: SAS.
- Susanto W, P. H. (2009). *Uji Kesesuaian Sebagai Aspek Penting Dalam Pengawasan Penggunaan Pesawat Sinar-X*. Bandung: BATAN.
- Suyatno, F. (2008). *Aplikasi Radiasi Sinar-X Di Bidang Kedokteran Untuk Menunjang Kesehatan Masyarakat*. Yogyakarta: BATAN.
- Thamrin T, M. A. (1998). *Fenomena Termoluminesensi Dan Pemanfaatannya Dalam Dosimetri*. Jakarta: BATAN.

- ThermoScientific. (2007). *Harshaw TLD Model 6600 Plus*. USA: Thermo Fisher Scientific.
- Timorti B, T. T. (2009). *Analisis Keselamatan Pesawat Sinar-X Di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Umum Daerah Sleman Yogyakarta*. Bandung: BATAN.
- USU. (2016). *Mekanisme Penyebaran Sinar-X*. Medan: USU.
- Verdianto, A. (2012). *Peningkatan Akurasi Proses Pembacaan Detektor TL Pada TLD Reader Harshaw Model 3500*. Jakarta: UI.
- Winata, D. O. (2011). *Koefisien Backscatter Factor Sinar-X Diagnostik Dalam Rentang RQR Pada ISO Water Slab Phantom*. Jakarta: UI.
- Wohni. (2002). *Energy and Directional Response for The Harshaw Dosemeter Holder 8814 and 8891*. Norwegia: NRPA.

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**



**Filter Aluminium Pesawat
Sinar-X**



Kolimator B3-80 (depan)



**Kolimator B4-40
(belakang)**



**Barometer, Hygrometer,
dan Termometer**



Laser



Tabung Nitrogen



1 set komputer dan TLD *Harshaw Reader*



**Fantom *Solid Water* PMMA
ukuran 30 x 30 x 15 cm³**



Sumber Radioaktif Cs-137



**TLD LiF: Mg, Ti Buatan
Harshaw**



**Pesawat Sinar X dan Mesin Kontrol Pesawat Sinar X
YXLON**

Lampiran 2 : Pengukuran Kerma Udara Pesawat Sinar-X

Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA

Energi : 12,7 keV

Pengecekan cacah latar belakang/ kebocoran arus sebelum pengukuran :

P	T	RH	M (pC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	0.00151
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	
100.7	19.83	60%	1.5	1.005623	1.50843	

Pengukuran dengan timer pada pesawat sinar-X :

p	T	RH	M (nC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)	kerma (Gy/menit)
100.7	19.78	58%	-5.535	1.005451	5.56517	5.56558	0.00026
100.7	19.78	58%	-5.538	1.005451	5.56819		
100.7	19.78	58%	-5.531	1.005451	5.56115		
100.7	19.78	58%	-5.533	1.005451	5.56316		
100.7	19.78	58%	-5.531	1.005451	5.56115		
100.7	19.78	58%	-5.539	1.005451	5.56920		
100.7	19.78	58%	-5.534	1.005451	5.56417		
100.7	19.78	58%	-5.536	1.005451	5.56618		
100.7	19.78	58%	-5.540	1.005451	5.57020		
100.7	19.78	58%	-5.537	1.005451	5.56718		

Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA

Energi : 12,7 keV

Pengecekan cacah latar belakang/ kebocoran arus sebelum pengukuran:

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

Energi : 16,5 keV

P	T	RH	M (pC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)
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	

Pengukuran dengan timer pada pesawat sinar-X :

P (kPa)	T (°C)	RH (%)	M (nC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)	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) : 20 kV / 5 mA

Energi : 16,5 keV

Pengecekan cacah latar belakang/ kebocoran arus sebelum pengukuran:

Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA

Energi : 20,4 keV

P	T	RH	M (pC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)
100.8	20.01	53%	-1.5	1.005243	1.50786	0.00176
100.8	20.01	53%	-1.0	1.005243	1.00524	
100.8	20.01	53%	-1.5	1.005243	1.50786	
100.8	20.01	53%	-2.0	1.005243	2.01049	
100.8	20.01	53%	-1.5	1.005243	1.50786	
100.8	20.01	53%	-2.0	1.005243	2.01049	
100.8	20.01	53%	-1.5	1.005243	1.50786	
100.8	20.01	53%	-2.0	1.005243	2.01049	
100.8	20.01	53%	-2.0	1.005243	2.01049	
100.8	20.01	53%	-2.5	1.005243	2.51311	

Pengukuran dengan timer pada pesawat sinar-X :

p	T	RH	M (nC)	Kpt	M x Kpt	M rata" (nC)	Kerma (Gy/menit)
100.8	19.73	54%	-6.685	1.004283	6.71363	6.71473	0.00032
100.8	19.73	54%	-6.682	1.004283	6.71062		
100.8	19.73	54%	-6.679	1.004283	6.70760		
100.8	19.73	54%	-6.677	1.004283	6.70559		
100.8	19.73	54%	-6.690	1.004283	6.71865		
100.8	19.73	54%	-6.685	1.004283	6.71363		
100.8	19.73	54%	-6.688	1.004283	6.71664		
100.8	19.73	54%	-6.694	1.004283	6.72267		
100.8	19.73	54%	-6.692	1.004283	6.72066		
100.8	19.73	54%	-6.689	1.004283	6.71765		

Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA

Energi : 20,4 keV

Lampiran 3 : Perhitungan Hp(10) dan Ku

M_{netto}	: $M_{rerata} - M_{bg}$
K_u (Kerma Udara)	: $M_{netto} \times N_k$
Hp (10)	: $K_u \times \text{Faktor Konversi}$
Faktor Konversi Hp (10) untuk 15 kV	: $0,06 \text{ Sv.Gy}^{-1}$
Faktor Konversi Hp (10) untuk 20 kV	: $0,27 \text{ Sv.Gy}^{-1}$
Faktor Konversi Hp (10) untuk 25 kV	: $0,55 \text{ Sv.Gy}^{-1}$
N_k untuk Energi 12,7 keV (15 kV)	: $47,20 \mu\text{Gy/nC}$
N_k untuk Energi 16,5 keV (20 kV)	: $46,20 \mu\text{Gy/nC}$
N_k untuk Energi 20,4 keV (25 kV)	: $45,20 \mu\text{Gy/nC}$

Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA

Energi : 12,7 keV

M_{rerata} (nC/menit)	M_{bg} (nC/menit)	M_{netto} (nC/menit)	K_s (...)	K_{pol} (...)	N_k ($\mu\text{Gy/nC}$)	K_u ($\mu\text{Gy/nC}$)	Hp (10) ($\mu\text{Sv/menit}$)
5,5655	0,0015	5,56	1	1	47,20	262,62	15,76

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

Energi : 16,5 keV

M_{rerata} (nC/menit)	M_{bg} (nC/menit)	M_{netto} (nC/menit)	K_s (...)	K_{pol} (...)	N_k ($\mu\text{Gy/nC}$)	K_u ($\mu\text{Gy/nC}$)	Hp (10) ($\mu\text{Sv/menit}$)
9,4770	0,0017	9,48	1	1	46,20	437,76	118,19

Tegangan (HV) / Arus (I) : 25 kV / 5 mA

Energi : 20,4 keV

M_{rerata} (nC/menit)	M_{bg} (nC/menit)	M_{netto} (nC/menit)	K_s (...)	K_{pol} (...)	N_k ($\mu\text{Gy/nC}$)	K_u ($\mu\text{Gy/nC}$)	Hp (10) ($\mu\text{Sv/menit}$)
6,7147	0,0017	6,71	1	1	45,20	303,43	166,88

Lampiran 4 : Waktu Penyinaran

Tegangan (HV) / Arus (I) : 15 kV / 5 mA

Energi : 12,7 keV

SDD (cm)	Dosis				
	0.1	0.5	1	1.5	3
200	6 menit 21 detik	31 menit 44 detik	63 menit 28 detik	95 menit 12 detik	190 menit 23 detik

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

Energi : 16,5 keV

SDD (cm)	Dosis (mSv)				
	0.1	0.5	1	1.5	3
200	51 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				
	0.1	0.5	1	1.5	3
200	36 detik	2 menit 60 detik	5 menit 60 detik	8 menit 59 detik	17 menit 59 detik

Lampiran 5 : Data Pembacaan TLD

Kondisi Pengukuran

SDD (Jarak) : 200 cm

HV : 15 kV

Energi : 12,7 keV

Posisi	Kode TLD	Dosis yang diberikan	K _{PT}	Bacaan TLD	Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
Kanan atas	1002955	3 mSv	1.00 5451	136,37	190 menit 23 detik	100.7	19.78	58%
Kanan bawah	1002925		1.00 5451	126,86				
Kiri atas	1001783		1.00 5451	139,23				
Kiri bawah	1002089		1.00 5451	138,39				
Kanan atas	1001761	1,5 mSv	1.00 5451	67,908	95 menit 12 detik	100.7	19.78	58%
Kanan bawah	1000255		1.00 5451	70,758				
Kiri atas	1002111		1.00 5451	64,870				
Kiri bawah	1002995		1.00 5451	77,113				
Kanan atas	1000458	1 mSv	1.00 5451	48,033	63 menit 28 detik	100.7	19.78	58%
Kanan bawah	1002969		1.00 5451	44,847				
Kiri atas	1000614		1.00 5451	49,163				
Kiri bawah	1001129		1.00 5451	49,909				

Kanan atas	1002830	0,5 mSv	1.00 5451	25,585	31 menit 44 detik	100.7	19.78	58%
Kanan bawah	1000636		1.00 5451	24,951		100.7	19.78	58%
Kiri atas	1000954		1.00 5451	26,674		100.7	19.78	58%
Kiri bawah	1001801		1.00 5451	27,849		100.7	19.78	58%
Kanan atas	2017531	0,1 mSv	1.00 5451	6,4611	6 menit 21 detik	100.7	19.78	58%
Kanan bawah	2017529		1.00 5451	6,5621		100.7	19.78	58%
Kiri atas	1002950		1.00 5451	6,5454		100.7	19.78	58%
Kiri bawah	2017521		1.00 5451	6,7071		100.7	19.78	58%

Kondisi Pengukuran

SDD (Jarak) : 200 cm

HV : 20 kV

Energi : 16,5 keV

Posisi	Kode TLD	Dosis yang diberikan	K _{PT}	Bacaan TLD	Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
Kanan atas	1002955	3 mSv	1.0014 39	173,83	25 menit 23 detik	101.1	19.77	55%
Kanan bawah	1002925		1.0014 39	164,80		101.1	19.77	55%
Kiri atas	1001783		1.0014 39	173,96		101.1	19.77	55%
Kiri bawah	1002089		1.0014 39	166,97		101.1	19.77	55%

Kanan atas	1001761	1,5 mSv	1.0014 39	87,526	12 menit 42 detik	101.1	19.77	55%
Kanan bawah	1000255		1.0014 39	84,381		101.1	19.77	55%
Kiri atas	1002111		1.0014 39	86,032		101.1	19.77	55%
Kiri bawah	1002995		1.0014 39	86,780		101.1	19.77	55%
Kanan atas	1000458	1 mSv	1.0014 39	58,158	8 menit 28 detik	101.1	19.77	55%
Kanan bawah	1002969		1.0014 39	58,105		101.1	19.77	55%
Kiri atas	1000614		1.0014 39	59,763		101.1	19.77	55%
Kiri bawah	1001129		1.0014 39	60,054		101.1	19.77	55%
Kanan atas	1002830	0,5 mSv	1.0014 39	30,394	4 menit 14 detik	101.1	19.77	55%
Kanan bawah	1000636		1.0014 39	31,603		101.1	19.77	55%
Kiri atas	1000954		1.0014 39	30,488		101.1	19.77	55%
Kiri bawah	1001801		1.0014 39	31,095		101.1	19.77	55%
Kanan atas	2017531	0,1 mSv	1.0014 39	7,5574	51 detik	101.1	19.77	55%
Kanan bawah	2017529		1.0014 39	7,3983		101.1	19.77	55%
Kiri atas	1002950		1.0014 39	7,1960		101.1	19.77	55%
Kiri bawah	2017521		1.0014 39	7,2931		101.1	19.77	55%

Kondisi Pengukuran

SDD (Jarak) : 200 cm

HV : 25 kV

Energi : 20,4 keV

Posisi	Kode TLD	Dosis yang diberikan	K _{PT}	Bacaan TLD	Waktu Penyinaran	P (kPa)	T (°C)	RH (%)
Kanan atas	1002955	3 mSv	1.005243	887,42	17 menit 59 detik	100,7	19,78	58%
Kanan bawah	1002925		1.005243	924,69		100,7	19,78	58%
Kiri atas	1001783		1.005243	909,30		100,7	19,78	58%
Kiri bawah	1002089		1.005243	880,75		100,7	19,78	58%
Kanan atas	1001761	1,5 mSv	1.005243	468,79	8 menit 59 detik	100,7	19,78	58%
Kanan bawah	1000255		1.005243	443,86		100,7	19,78	58%
Kiri atas	1002111		1.005243	462,35		100,7	19,78	58%
Kiri bawah	1002995		1.005243	455,32		100,7	19,78	58%
Kanan atas	1000458	1 mSv	1.005243	305,10	2 menit 60 detik	100,7	19,78	58%
Kanan bawah	1002969		1.005243	319,56		100,7	19,78	58%
Kiri atas	1000614		1.005243	313,43		100,7	19,78	58%
Kiri bawah	1001129		1.005243	315,64		100,7	19,78	58%
Kanan	1002830		1.005243	163,78		100,7	19,78	58%

atas		0,5 mSv			36 detik			
Kanan bawah	1000636		1.005243	166,82		100,7	19,78	58%
Kiri atas	1000954		1.005243	164,30		100,7	19,78	58%
Kiri bawah	1001801		1.005243	160,04		100,7	19,78	58%
Kanan atas	2017531	0,1 mSv	1.005243	36,237	36 detik	100,7	19,78	58%
Kanan bawah	2017529		1.005243	35,589		100,7	19,78	58%
Kiri atas	1002950		1.005243	35,897		100,7	19,78	58%
Kiri bawah	2017521		1.005243	36,579		100,7	19,78	58%

Lampiran 6 : Perhitungan Ketidakpastian Kurva Kalibrasi

SDD : 200 cm
 HV : 15 kV
 Energi : 12,7 keV

D_T (mSv)	R(EL. 2)	D_T (mSv)	u_A (%)	u_{res} (%)	u_{irr} (%)	u_{fad} (%)	u_{BG} (%)	u_{kal} (%)	u_c (%)	u_{exp} (%)
0.1	6.6	0.1	0.8	1.52	2	1.6	5.59	14.00	15.39	30.77
0.5	26.3	0.5	2.4	0.38	2	1.6	5.59	1.27	6.74	13.49
1	48.0	1	2.3	0.21	2	1.6	5.59	0.41	6.59	13.18
1.5	70.2	1.5	3.7	0.14	2	1.6	5.59	0.35	7.20	14.40
3	135.2	3	2.1	0.07	2	1.6	5.59	0.10	6.51	13.01
								AVG =	8.49	16.97

SDD : 200 cm
 HV : 20 kV
 Energi : 16,5 keV

D _T (mSv)	R(EL. 2)	D _T (mSv)	u _A (%)	u _{res} (%)	u _{irr} (%)	u _{fad} (%)	u _{BG} (%)	u _{kal} (%)	u _c (%)	u _{exp} (%)
0.1	7.4	0.1	1.0	1.36	2	1.6	5.59	5.49	8.42	16.84
0.5	30.9	0.5	0.9	0.32	2	1.6	5.59	0.54	6.25	12.51
1	59.0	1	0.9	0.17	2	1.6	5.59	0.39	6.23	12.46
1.5	86.2	1.5	0.8	0.12	2	1.6	5.59	0.06	6.20	12.41
3	169.9	3	1.4	0.06	2	1.6	5.59	0.05	6.31	12.62
								AVG =	6.68	13.37

SDD : 200 cm
 HV : 25 kV
 Energi : 20,4 keV

D _T (mSv)	R(EL. 2)	D _T (mSv)	u _A (%)	u _{res} (%)	u _{irr} (%)	u _{fad} (%)	u _{BG} (%)	u _{kal} (%)	u _c (%)	u _{exp} (%)
0.1	36.1	0.1	0.6	0.28	2	1.6	5.59	7.99	10.11	20.21
0.5	163.7	0.5	0.9	0.06	2	1.6	5.59	1.07	6.30	12.61
1	313.4	1	1.0	0.03	2	1.6	5.59	0.85	6.29	12.57
1.5	457.6	1.5	1.2	0.02	2	1.6	5.59	0.34	6.27	12.55
3	900.5	3	1.1	0.01	2	1.6	5.59	0.24	6.26	12.52
								AVG =	7.05	14.09

Lampiran 7: Penyinaran Keseragaman

No. ID	Respon	UAL	UWL	LAL	LWL
1000255	41.449	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1001761	41.354	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002995	41.620	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002111	41.812	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1000458	42.222	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1000614	42.086	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1001129	42.232	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002969	42.226	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1001783	40.005	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002089	40.989	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002925	40.176	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002955	39.758	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1000636	44.854	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1000954	44.020	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1001801	43.313	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002830	44.093	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
1002950	47.363	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
2017521	47.297	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
2017529	47.102	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256
2017531	47.904	50.83554	48.25494	35.35196	37.93256

Lampiran 8: Perhitungan Kurva Terompet

SDD : 200 cm
 HV : 15 kV
 Energi : 12,7 keV

D_T (mSv)	Dm	Dm/Dt	EURADOS		IAEA	
			ba	bb	ba	bb
0.1	0.07	0.70	1.97	-0.47	2.00	-0.67
0.5	0.52	1.04	1.69	0.44	2.00	0.40
1	1.01	1.01	1.61	0.55	2.00	0.53
1.5	1.52	1.01	1.58	0.59	2.00	0.58
3	2.99	1.00	1.54	0.63	2.00	0.62

SDD : 200 cm
 HV : 20 kV
 Energi : 16,5 keV

D_T (mSv)	Dm	Dm/Dt	EURADOS		IAEA	
			ba	bb	ba	bb
0.1	0.1	1.00	1.97	-0.47	2.00	-0.67
0.5	0.5	1.00	1.69	0.44	2.00	0.40
1	1.0	1.00	1.61	0.55	2.00	0.53
1.5	1.5	1.00	1.58	0.59	2.00	0.58
3	3.0	1.00	1.54	0.63	2.00	0.62

SDD : 200 cm
 HV : 25 kV
 Energi : 20,4 keV

D_T (mSv)	Dm	Dm/Dt	EURADOS		IAEA	
			Ba	bb	ba	bb
0.1	0.08	0.80	1.97	-0.47	2.00	-0.67
0.5	0.52	1.04	1.69	0.44	2.00	0.40
1	1.02	1.02	1.61	0.55	2.00	0.53
1.5	1.51	1.01	1.58	0.59	2.00	0.58
3	3.02	1.01	1.54	0.63	2.00	0.62