



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOEFISIEN *BACKSCATTER FACTOR* SINAR-X DIAGNOSTIK
DALAM RENTANG RQR (*RADIATION QUALITIES IN
RADIODIAGNOSTIC*) PADA *ISO WATER SLAB PHANTOM***

SKRIPSI

DWI OKTAVINA WINATA

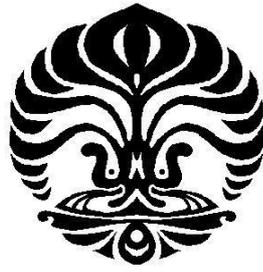
0606068165

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOEFISIEN *BACKSCATTER FACTOR* SINAR-X DIAGNOSTIK
DALAM RENTANG RQR (*RADIATION QUALITIES IN
RADIODIAGNOSTIC*) PADA *ISO WATER SLAB PHANTOM***

SKRIPSI

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

DWI OKTAVINA WINATA

0606068165

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM**

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dwi Oktavina W

NPM : 0606068165

Tanda Tangan : 

Tanggal : 13 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dwi Oktavina Winata
NPM : 0606068165
Program Studi : S1 Fisika, Peminatan Fisika Medis dan Biofisika
Judul Skripsi : Koefisien *Backscatter Factor* Sinar-X Diagnostik Dalam Rentang RQR (*Radiation Qualities in Radiodiagnostic*) Pada *ISO Water Slab Phantom*.

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Djarwani S

()

Pembimbing II : Heru Prasetyo, M.Si

()

Penguji I : Dwi Seno Kuncoro, M.Si

()

Penguji II : Kristina Tri Wigati, M.Si

()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 13 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan yang selalu menyatakan anugerah-Nya setiap saat kepada penulis, termasuk pada saat ini penulis boleh melewati masa sulit dalam penelitian dan akhirnya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Science jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Penulis juga sangat bersyukur karena kehadiran berbagai pihak yang sangat berperan membantu, mendukung, memberi semangat dan mendoakan penulis, antara lain :

1. Ibu Prof. Dr. Djarwani S, selaku pembimbing I, terima kasih sudah mau memberi kesempatan kepada penulis untuk diskusi dan memberikan koreksi yang membangun.
2. Bapak Heru Prasetio M.Si, selaku pembimbing II, terima kasih pak sudah dengan sabar mau menolong penulis dalam penelitian, diskusi melalui berbagai media sehingga memudahkan penulis berdiskusi, dan memberi masukan yang membangun.
3. Ibu Diah dan ibu Helfi, terima kasih telah menolong penulis untuk *annealing* dan pembacaan TLD yang digunakan dalam penelitian ini.
4. Ibu Tuti yang mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian di BATAN Mampang.
5. Bapak Nurman yang memberikan banyak cerita pengalaman dan informasi yang membangun.
6. Mas Assef, terima kasih telah mengajarkan kepada penulis tentang kalibrasi dan membantu dalam proses pengambilan data serta mas Kri yang ikut terlibat membantu penulis dalam pengambilan data.
7. Mama, yang dengan kasih tanpa syarat selalu mendoakan penulis dan memperhatikan penulis. Terima kasih ma.
8. Dion, yang memperhatikan dan menyemangati penulis di dalam penulisan skripsi ini.

9. Teman seperjuangan di Fisika yang sama-sama mengerjakan skripsi, Gita, Emi, Rifqo, Lidya, Agus, ka Elia, ka Vena, ka Dado, ka Ika dan beberapa teman yang lain yang belum disebutkan, terima kasih untuk semangatnya dan kebersamaannya.
10. Mursi, teman kosan dan seangkatan 2006 yang telah memberi semangat dan pengalamannya kepada penulis dan terima kasih untuk kebersamaannya.
11. KTB ka Christina yang pernah ada untuk membawa penulis semakin bertumbuh dan semakin mengalami kasih, terima kasih untuk doa-doanya dan kebersamaannya.
12. AKK, yang menyemangati dan mendoakan penulis serta membuat penulis untuk berjuang membagikan kasih, terimakasih untuk keberadaan kalian dan akan selalu merindukan kalian.
13. Seluruh staff Labkom UPP-IPD Fisika Dasar yang mengizinkan penulis untuk part-time sehingga dapat menunjang kebutuhan penulis.
14. Seluruh dosen Fisika dan Fisika Medis yang telah membagikan ilmu pengetahuan yang sangat berguna kepada penulis.
15. Mba Ratna dan seluruh staff informasi dan perpustakaan Departemen Fisika yang telah menolong penulis dalam mendapatkan informasi yang penting bagi penulis dan belajar di ruangan perpustakaan.
16. Bagian Kemahasiswaan dan Informasi Beasiswa dan setiap pihak yang memilih penulis untuk menerima beasiswa PPA/BBM dalam beberapa periode perkuliahan, terima kasih atas pertolongannya.

Akhirnya, Tuhan memberkati semua pihak yang telah membantu dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini sehingga penulis menerima saran dan masukan yang diberikan.

Mei 2011

Penulis

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

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

Nama : Dwi Oktavina Winata
NPM : 0606068165
Program Studi : S1 Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

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

Koefisien *Backscatter Factor* Sinar-X Diagnostik Dalam Rentang RQR
(*Radiation Qualities in Radiodiagnostic*) Pada *ISO Water Slab Phantom*.

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 13 Juni 2011
Yang menyatakan



(Dwi Oktavina Winata)

ABSTRAK

Nama : Dwi Oktavina W
Program Studi : Fisika Medis dan Biofisika
Judul : Koefisien *Backscatter Factor* Sinar-X Diagnostik Dalam Rentang RQR (*Radiation Qualities in Radiodiagnostic*) Pada *ISO Water Slab Phantom*

Penentuan koefisien faktor hamburan balik *ISO water slab phantom* pada kualitas radiasi RQR 5 sampai RQR 10 dilakukan dengan menggunakan dosimeter termoluminisensi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui faktor hamburan balik *ISO water slab phantom* dan untuk mengetahui apakah koefisien kalibrasi TLD di udara dapat digunakan untuk pengukuran di permukaan fantom. Tegangan tabung sinar-x yang digunakan antara 70 kV sampai 150 kV pada spesifikasi kualitas radiasi RQR untuk pesawat sinar-x Y.TU 320-D03 dengan menggunakan detektor standar Unfors Xi. Faktor hamburan balik untuk lapangan radiasi 12,4 cm x 12,4 cm sedikit meningkat dengan kualitas radiasi RQR 5 sampai dengan RQR 10 untuk HVL 2,58 mmAl sampai dengan 6,57 mmAl. Koefisien kalibrasi TLD di udara dapat digunakan untuk perhitungan dosis permukaan dalam kalibrasi TLD di permukaan fantom untuk *ISO water slab phantom*. Faktor koreksi kualitas radiasi (k_{Q,Q_0}) TLD di permukaan dapat ditentukan dengan membandingkan bacaan TLD pada kualitas radiasi referensi terhadap bacaan TLD pada kualitas radiasi tertentu dalam rentang RQR. Dengan diketahuinya faktor hamburan balik, kalibrasi cukup hanya dilakukan di udara.

Kata kunci : Kualitas radiasi RQR, koefisien kalibrasi TLD, *ISO water slab phantom*, faktor hamburan balik.

ABSTRACT

Name : Dwi Oktavina W
Program Study : Medical Physics and Biophysics
Title : Backscatter Factor Coefficient of ISO Water Slab Phantom in RQR (Radiation Qualities In Radiodiagnostic) Range of Diagnostic X-Ray

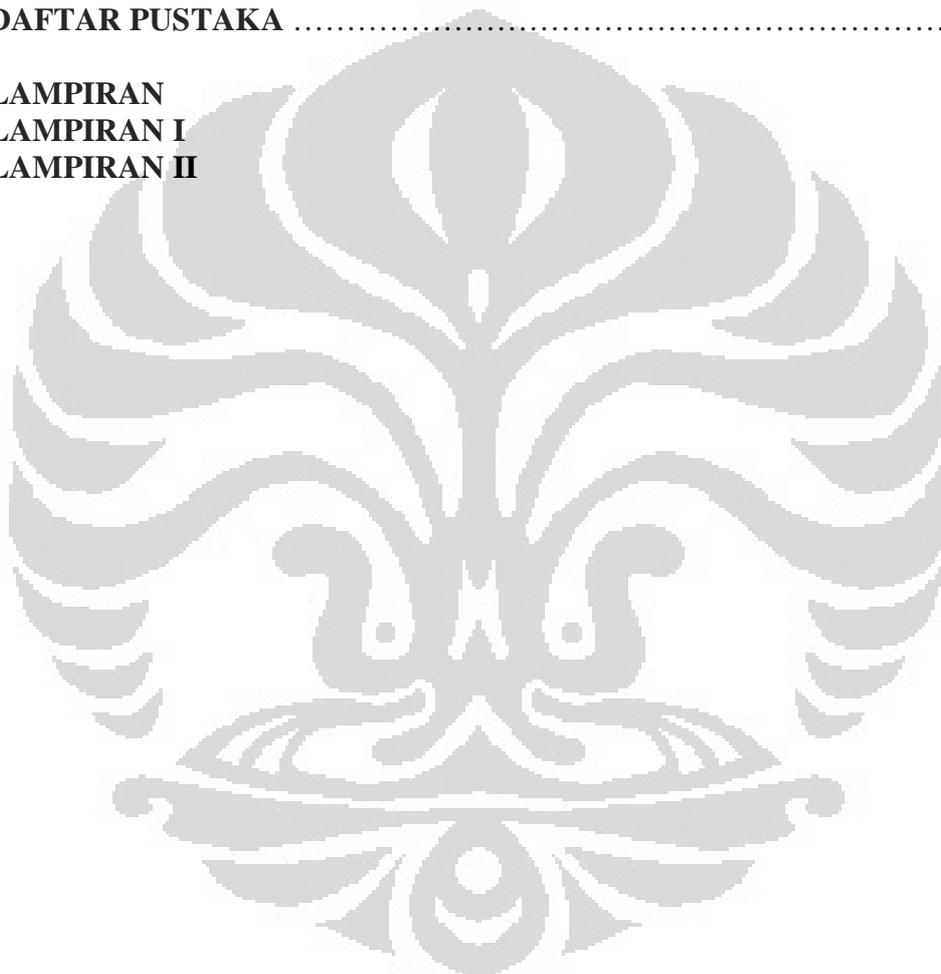
Determination of backscatter factor coefficient using ISO water slab phantom at radiation qualities RQR 5 to RQR 10 are done using thermoluminescence dosimeters. The research are done to obtain the backscatter factors at ISO water slab phantom and to know whether calibration coefficient in the air sufficient for measurement on the phantom surface. X-ray tube voltage measurement between 70 kV to 150 kV at RQR spesification using x-ray tube Y. TU 320-D03 using Unfors Xi as standard detector. Backscatter factor for 12.4 cm x 12.4 cm field size has increasing for RQR 5 to RQR 10 with HVL 2.58 mmAl up to 6.57 mmAl. Calibration factor of TLD in air can be use to calculate entrance surface dose and calibrate TLD on ISO water slab phantom. TLD beam quality correction factor on the phantom surface can be determined by comparing the TLD readings on reference to TLD readings in particular radiation qualities RQR. By knowing backscatter factor, calibration is sufficient to be done in air.

Keyword : RQR radiation qualities, calibration coefficient of TLD, ISO water slab phantom, backscatter factor.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSYARATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Metodologi Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Terjadinya Sinar-X	5
2.2 Interaksi Foton dengan Materi	7
2.2.1 Efek Fotolistrik	7
2.2.2 Hamburan Compton.....	8
2.3 Stopping Power	9
2.4 Alat Ukur Radiasi	10
2.4.1 <i>Solid State Dosimeter</i>	10
2.4.1.1 Detektor Semikonduktor	10
2.4.1.2 Dosimeter Termoluminisensi (TLD)	10
2.5 Fantom	21
2.5.1 <i>ISO Water Slab Phantom</i>	22
2.6 Kualitas Radiasi Standar RQR	22
2.7 Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder	23
2.8 Standar Radiologi Diagnostik	25
2.8.1 Standar <i>Air Kerma</i>	25
2.8.1.1 <i>Incident Air Kerma</i>	25
2.8.1.2 <i>Entrance Surface Air Kerma</i>	25
2.9 Kalibrasi Alat Ukur	25
2.9.1 Koefisien Kalibrasi	26
2.9.2 Kondisi Referensi	27
2.9.2.1 Faktor Koreksi Kualitas Berkas Radiasi	27
BAB 3. EKSPERIMEN	
3.1 Peralatan	30
3.2 Metode Penelitian	30

3.2.1 Kalibrasi TLD-100 LiF:Mg:Ti di Udara	30
3.2.1 Kalibrasi TLD-100 LiF:Mg:Ti di Permukaan Fantom	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Penentuan Dosis di Udara.....	33
4.2 Penentuan Faktor Hamburan Balik Pada Rentang RQR	40
BAB 5. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	
LAMPIRAN I	
LAMPIRAN II	



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Tabung Sinar-X	6
Gambar 2.2 Efek Fotolistrik	8
Gambar 2.3 Hamburan Compton	9
Gambar 2.4 Gambaran Model Satu Trap dan Proses Bagaimana Elektron Diproduksi dan Diperangkap	12
Gambar 2.5 Diagram Model Pita Untuk Proses TL Dalam Kristal, (a) Saat Terkena Radiasi, (b)-(f) Alternatif Proses Saat Dipanaskan.....	14
Gambar 2.6 Skematik Diagram TLD <i>Reader</i>	20
Gambar 2.7 Fantom <i>ISO Water Slab</i>	22
Gambar 3.1 <i>Set-up</i> Kalibrasi TLD di Udara	30
Gambar 3.2 <i>Set-up</i> Kalibrasi TLD di Permukaan Fantom	32
Gambar 4.1 <i>Set-up</i> Kalibrasi TLD-100 di Udara	34
Gambar 4.2 Koefisien Kalibrasi TLD-100 di Udara Terhadap Mean Energi	37
Gambar 4.3 Faktor Koreksi Kualitas Berkas TLD-100 di Udara Terhadap Energi Rata-rata	38
Gambar 4.4 <i>Set-up</i> Kalibrasi TLD-100 di Permukaan Fantom.....	39
Gambar 4.5 Faktor Hamburan Balik <i>ISO Water Slab Phantom</i> Terhadap Energi Rata-rata	41
Gambar 4.6 Nilai BSF untuk Berbagai Kualitas Radiasi	43
Gambar 4.7 Faktor Koreksi Kualitas Radiasi TLD-100 di Permukaan Fantom.....	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nama Kristal TLD Beserta Nama Komersialnya.....	18
Tabel 2.2 Kualitas Radiasi Rentang RQR	23
Tabel 3.1 Filter Tambahan Kualitas Radiasi RQR	28
Tabel 3.2 Energi Rata-rata Untuk Kualitas Radiasi RQR	29
Tabel 4.1.1 Verifikasi Waktu Penyinaran TLD-100 di Udara Berdasarkan Ki	35
Tabel 4.1.2 Koefisien Kalibrasi TLD dan Faktor Koreksi Kualitas Berkas TLD di Udara.....	36
Tabel 4.2.1 Verifikasi Waktu Penyinaran TLD-100 di Permukaan Fantom Berdasarkan Ki	40
Tabel 4.2.2 Faktor Hamburan Balik pada RQR5 sampai RQR10	41
Tabel 4.2.3 Faktor Hamburan Balik Berbagai Kualitas Radiasi	42
Tabel 4.2.4 Estimasi Dosis di Permukaan Fantom (ESD)	44
Tabel 4.2.5 Faktor Koreksi Kualitas Radiasi TLD di Permukaan Fantom	45

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hingga saat ini penemuan sinar-x membawa dampak positif di berbagai bidang seperti bidang kedokteran dan industri. Khususnya dalam bidang kedokteran, sinar-x dimanfaatkan untuk diagnostik penyakit di dalam tubuh dan untuk terapi kanker. Beberapa instrumentasi medis untuk diagnostik dengan modalitas sinar-x adalah radiografi sinar-x konvensional, mammografi, CT Scan, SPECT-CT dan PET.

Dalam dunia kedokteran, pesawat sinar-x merupakan suatu instrumentasi medis yang keberadaannya sangat penting dan ada hampir di setiap rumah sakit. Dengan menggunakan pesawat sinar-x biasa yang sering disebut pesawat sinar-x konvensional, diagnosis penyakit di dalam tubuh manusia dapat dilakukan dengan mudah tanpa adanya pembedahan.

Pesawat sinar-x konvensional atau pesawat sinar-x diagnostik dalam pemakaiannya harus diusahakan yang terbaik yaitu dosis yang diterima pasien tidak melebihi dosis yang dibutuhkan untuk menghasilkan citra diagnostik yang berkualitas. Oleh karena itu, harus dilakukan pemeriksaan rutin dosis pasien. Pemeriksaan ini meliputi pengukuran dosis di udara dan dosis di fantom. Dosis yang diterima pasien diagnostik berkaitan dengan keluaran pesawat sinar-x. Dengan demikian, setiap pesawat sinar-x diagnostik sebelum harus dilakukan kalibrasi secara rutin.

Untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat maka peralatan yang akan digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu dan kondisinya disesuaikan dengan kondisi standar. Kalibrasi keluaran pesawat sinar-x dapat dilakukan oleh instansi yang berwenang di Indonesia yaitu BATAN. Untuk mengukur keluaran

pesawat sinar-x diperlukan suatu alat yang dapat mendeteksi adanya radiasi yang disebut detektor.

Setiap detektor mempunyai tingkat sensitifitas yang berbeda untuk tingkat energi radiasi yang berbeda. Detektor dikatakan berfungsi dengan baik jika detektor tersebut mampu menyimpan informasi yang sesuai dengan dosis radiasi yang diterima. Oleh sebab itu, detektor yang digunakan untuk mengukur radiasi sinar-x juga harus dikalibrasi terlebih dahulu. Parameter detektor yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai radiasi yang terukur sesuai dengan nilai radiasi acuan disebut faktor koreksi. Faktor koreksi ini perlu diperhitungkan dalam pengukuran dosis radiasi.

Saat dilakukan kalibrasi, kondisi lingkungan ruang kalibrasi harus disesuaikan dengan kondisi referensi. Keberhasilan kalibrasi detektor sesuai dengan acuan sangat menentukan akurasi hasil pengukuran oleh detektor. Pada saat kalibrasi dilakukan di udara, maka koefisien kalibrasi dapat diketahui. Sedangkan kalibrasi dilakukan di permukaan fantom, belum dapat diketahui koefisien kalibrasinya karena adanya faktor koreksi hamburan balik. Oleh karena itu, saya akan melakukan penelitian untuk menentukan koefisien faktor hamburan balik dari fantom *ISO water slab* menggunakan dosimeter termoluminisensi (TLD) pada rentang *Radiation Qualities in Radiodiagnostic (RQR)* untuk keperluan kalibrasi.

1.2 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada pembahasan tentang kalibrasi dengan menggunakan detektor TLD yang terkalibrasi, dilakukan di udara dan di permukaan fantom untuk RQR 5 sampai RQR 10. Selain itu, dibahas juga tentang pengaruh perubahan kualitas radiasi sinar-x terhadap faktor hamburan balik.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mencari nilai faktor hamburan balik dari fantom *ISO water slab* pada RQR 5 sampai RQR 10 dan untuk mengetahui

apakah koefisien kalibrasi TLD di udara dapat digunakan untuk kalkulasi dosis permukaan saat kalibrasi TLD dipermukaan fantom.

1.4 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengukur dosis sinar-x di suatu titik acuan di udara yaitu pada jarak 100 cm dari fokus tabung sinar-x dengan menggunakan detektor Unfors Xi. Pengukuran dikerjakan pada rentang energi RQR. Kemudian TLD yang sudah terkalibrasi diletakkan di udara pada titik yang sama dengan titik acuan dan di radiasi pada rentang RQR serta dilakukan pembacaan dosis TLD. Kemudian dengan metode yang sama, dilakukan pengukuran dosis di udara menggunakan detektor Unfors Xi lalu detektor TLD terkalibrasi diletakkan di permukaan fantom *ISO water slab*, di radiasi pada jarak 100 cm dari fokus tabung sinar-x pada rentang RQR dan dilakukan pembacaan TLD dengan *TLD Reader*. Untuk menentukan faktor hamburan balik dilakukan perhitungan dengan membandingkan hasil bacaan TLD di permukaan fantom dan hasil bacaan TLD di udara.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan ini dibagi menjadi beberapa bab dan bab-bab ini dibagi lagi menjadi beberapa sub-bab yaitu :

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan secara umum latar belakang permasalahan, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berupa beberapa teori yang menjadi dasar penelitian ini dan pembahasan karakteristik instrumen yang digunakan sebagai hasil studi literatur.

BAB III. METODE PENELITIAN

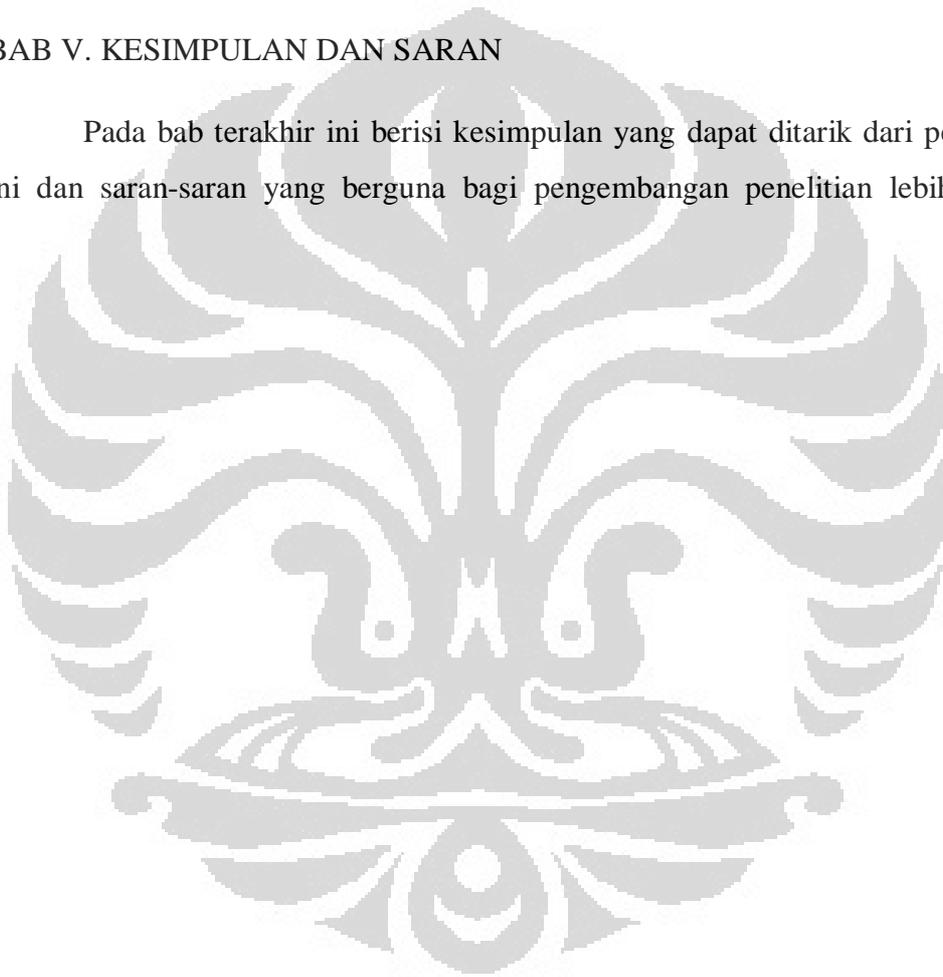
Bab ini berisi tentang bahan yang diperlukan dan peralatan yang digunakan serta metode pengambilan data penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data hasil penelitian dan analisis hasil penelitian serta penjelasan mengenai hasil yang telah diperoleh dalam penelitian.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab terakhir ini berisi kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini dan saran-saran yang berguna bagi pengembangan penelitian lebih lanjut.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

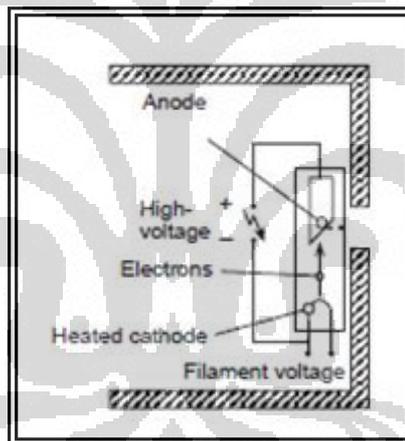
2.1 Terjadinya Sinar-X

Sinar-X dihasilkan ketika elektron-elektron dipercepat dengan kecepatan tinggi menumbuk suatu bahan bernomor atom tinggi seperti tungsten. Tabung sinar-X terdiri dari pasangan elektroda (katoda dan anoda) dalam tabung gelas tertutup yang hampa udara. Ruang diantara anoda dan katoda dibuat hampa udara agar elektron-elektron dari katoda tidak bertumbukan dengan molekul-molekul gas udara dan pergerakan elektron menuju anoda tidak terganggu. Katoda dari bahan filamen (lilitan) kawat wolfram yang ditempatkan pada cekungan pemfokus elektron dan anoda dari bahan tembaga pejal yang diujungnya diberi suatu target tungsten atau logam campuran tungsten rhenium (90% tungsten, 10% rhenium). Campuran rhenium pada tungsten membuat target lebih kuat dan mengurangi tekanan akibat panas. Ketika filamen dipanaskan oleh *filament supply* sampai 1890°K - 2540°K , elektron-elektron keluar dari permukaan filamen. Diantara anoda dan katoda diberikan beda tegangan (dalam kV) yang cukup tinggi sehingga elektron-elektron dari permukaan katoda itu bergerak dengan kecepatan tinggi menyeberangi ruang hampa menuju anoda dalam tabung [Dede Sujadi, 2007].

Elektron-elektron yang bergerak itu menyebabkan timbulnya arus elektron dalam tabung sehingga timbul arus listrik pada rangkaian, dari anoda ke katoda yang dicatat oleh miliammeter sebagai arus tabung. Peningkatan temperatur filamen atau pemanasan filamen untuk tegangan tertentu akan memperbesar jumlah elektron sehingga menghasilkan peningkatan arus tabung. Tegangan yang diberikan antara anoda dan katoda menentukan kecepatan elektron. Bertambahnya beda tegangan meningkatkan kecepatan elektron sehingga mempercepat terjadinya tumbukan antara elektron-elektron dengan target. Tumbukan elektron dengan atom target menyebabkan elektron kehilangan

energinya. Hilangnya energi elektron dapat disebabkan karena tumbukan (*collisional losses*) yang mencakup tumbukan dengan elektron orbit atom dan karena radiasi (*radiation losses*) yang mencakup interaksi di daerah inti atom[Dede Sujadi, 2007].

Saat elektron-elektron tersebut sampai di anoda, sinar- x diemisikan ke segala arah. Sebagian diserap oleh target, sebagian yang lain keluar sebagai berkas primer dalam bentuk kerucut. Tegangan yang digunakan dalam radiologi diagnostik, kurang dari 1% energi dari elektron diubah menjadi sinar-x dan 99% menjadi panas yang harus dihilangkan dari anoda. Anoda didesain dengan bentuk seperti mangkuk untuk mengumpulkan dan memfokuskan elektron-elektron pada sebagian kecil bidang anoda yang disebut titik fokus. Dengan demikian, sinar-x yang keluar melalui titik fokus itu yang akan digunakan dalam keperluan klinik.



[Sumber : International Atomic Energy Agency, 2000]

Gambar 2.1 Tabung sinar-x

Sinar-x merupakan suatu gelombang elektromagnetik yang mempunyai panjang gelombang yang sangat pendek sehingga dapat menembus benda-benda yang dilaluinya. Berdasarkan terjadinya, sinar-x dibedakan menjadi dua yaitu sinar-x bremsstrahlung dan sinar-x karakteristik.

Sinar-x bremsstrahlung terjadi karena adanya interaksi Coulomb yang terjadi antara elektron dengan inti suatu materi. Selama interaksi Coulomb antara

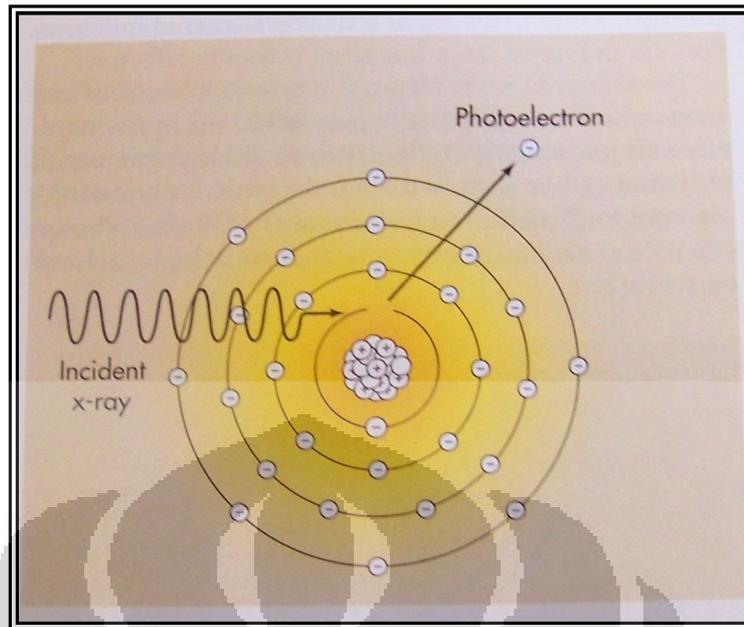
elektron dengan inti, terjadi perlambatan elektron dan elektron kehilangan sebagian energinya dalam bentuk foton bremsstrahlung atau sinar-x bremsstrahlung. Besarnya energi sinar-x bremsstrahlung sama dengan energi kinetik elektron pada awal terjadinya perlambatan.

Sinar-x karakteristik terjadi akibat adanya interaksi Coulomb yang terjadi antara elektron dengan elektron pada orbit atom dari suatu materi. Selama interaksi Coulomb antara elektron dengan elektron pada suatu orbital, elektron pada suatu orbital terpental keluar dari lintasannya dan lintasan yang kosong tersebut diisi oleh elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi. Perpindahan elektron dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah tersebut disertai emisi foton yang disebut sinar-x karakteristik. Sinar-x karakteristik mempunyai energi yang besarnya sama dengan perbedaan dua tingkat energi elektron serta merupakan energi karakteristik dari setiap jenis atom.

2.2 Interaksi Foton dengan Materi

2.2.1 Efek Fotolistrik

Peristiwa yang terjadi ketika radiasi foton mengenai suatu materi, energi foton akan diserap seluruhnya oleh materi disebut efek fotolistrik. Energi foton yang diserap itu digunakan untuk mengeluarkan elektron dari ikatan inti. Elektron-elektron yang dilepaskan merupakan elektron-elektron pada kulit bagian dalam seperti kulit K. Elektron yang terpancar keluar dinamakan foto elektron. Efek fotolistrik terjadi pada energi foton rendah kira-kira 50 KeV. [J.F Gabriel, 1996]

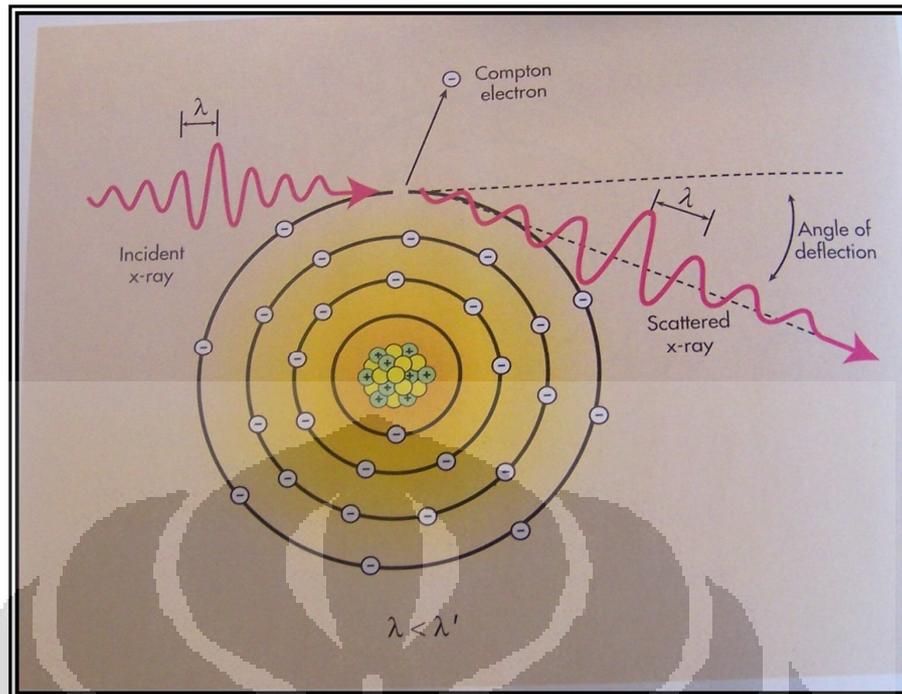


[Sumber : "Week 4a Chapter 12 X-ray Interaction with Matter 61," n.d.]

Gambar 2.2 Efek Fotolistrik

2.2.2 Hamburan Compton

Peristiwa yang terjadi ketika foton mengenai suatu materi dan energi foton hanya diserap sebagian oleh materi untuk mengeluarkan elektron dari atom dan sebagian energi akan terpancar sebagai radiasi hamburan dengan energi lebih rendah dari energi semula disebut peristiwa hamburan Compton. Efek Compton terjadi pada elektron-elektron bebas atau elektron yang terikat secara lemah pada lapisan kulit terluar [J.F Gabriel, 1996].



Sumber : ("Week 4a Chapter 12 X-ray Interaction with Matter 61,"n.d.)

Gambar 2.3 Hamburan Compton

2.3 Stopping Power

Stopping power adalah hilangnya energi secara tidak elastis dari suatu elektron yang bergerak melewati medium dengan densitas ρ yang dideskripsikan sebagai total energi massa *stopping power* yang mewakili energi kinetik yang hilang dari elektron per unit panjang. Total energi massa *stopping power* ini terdiri dari dua komponen yaitu *mass collision stopping power* dan *mass radiative stopping power*. *Mass collision/ionisation stopping power* merupakan hilangnya energi akibat hamburan dan terkarakterisasi, dihasilkan dari interaksi elektron dengan elektron orbital yaitu eksitasi atomik dan ionisasi. Ionisasi adalah keluarnya elektron orbital dari atom suatu materi dan eksitasi atomik adalah berpindahnya elektron orbital dari atom suatu materi dari level energi yang rendah ke level energi yang lebih tinggi. *Mass radiative stopping power* merupakan hilangnya energi karena interaksi Coulomb antara electron dan inti dari atom suatu medium yang mengakibatkan hamburan elektron dan hilangnya energi elektron dengan dihasilkannya sinar-x bremsstrahlung.

2.4 Alat Ukur Radiasi

Alat ukur radiasi standar sekunder adalah alat ukur radiasi standar yang mempunyai ketepatan tinggi dengan penyimpangan tidak lebih dari 0,5 % pada tingkat kepercayaan 99,9% dan telah dikalibrasi atau dibandingkan dengan standar primer. Alat ukur radiasi lapangan adalah alat ukur radiasi yang digunakan dalam pengukuran rutin untuk keselamatan radiasi seperti keperluan klinik, penelitian atau pekerjaan industri.[Eri Hiswara, 1994]

2.4.1 *Solid State Dosimeter*

2.4.1.1 Detektor Semikonduktor

Detektor semikonduktor berukuran kecil dan secara langsung merespon terhadap radiasi, gabungan keduanya merupakan keunggulan dari *solid state detector*. Detektor ini menghasilkan sinyal yang besar untuk radiasi yang kecil, merupakan detektor rigid dan tidak memerlukan koreksi tekanan yang membuat detektor ini cocok untuk beberapa aplikasi klinik. Dioda adalah peralatan semikonduktor yang paling sederhana, yang terdiri dari p-n *junction* antara tipe-p dan tipe-n dari semikonduktor. Ketika radiasi mengenai semikonduktor, pasangan *electron-hole* diinduksi karena *junction* menjadi konduktif dan arus meningkat dengan laju produksi ion. Besar sinyal yang dihasilkan tergantung dari sifat radiasi mengenai dan pada kemampuan untuk menembus *junction*. Detektor ini ada ketergantungan terhadap energi dan beberapa arah sensitifitas dari detektor. Pabrik menggunakan filter metal untuk mengurangi ketergantungan energi dari sinyal *solid state detector* dan kemungkinan lain untuk mengurangi efek elektronik.

2.4.1.2 Dosimeter Termoluminisensi (TLD)

Dosimeter ini menggunakan kristal anorganik termoluminisensi, misalnya bahan LiF atau CaSO₄. Dosimeter ini digunakan dalam jangka waktu tertentu, misalnya satu bulan baru kemudian diproses untuk mengetahui jumlah dosis radiasi yang sudah diterimanya. Pemrosesan dilakukan dengan memanaskan kristal TLD sampai temperatur tertentu, kemudian mendeteksi percikan-percikan

Universitas Indonesia

cahaya yang dipancarkannya. Keunggulan TLD adalah terletak pada ketelitiannya. Selain itu, ukuran kristal TLD relatif lebih kecil dan setelah diproses kristal TLD tersebut dapat digunakan lagi.

TLD terbuat dari bahan yang mampu menyimpan energi radiasi pengion yang diterimanya. Sebelum TLD digunakan, TLD butuh diannealing untuk menghilangkan sinyal-sinyal sisa.

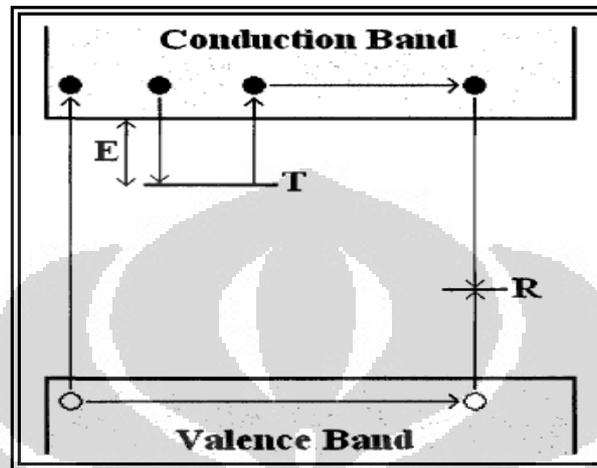
❖ Proses Termoluminisensi

Proses termoluminisensi, elektron akan “kembali” ke orbit semula bila bahan penyerapnya dipanaskan sampai temperatur tertentu. Jadi, selama belum dipanaskan, elektron-elektron yang tereksitasi tersebut masih “terjebak” sehingga tidak bisa kembali ke orbit semula. Bila dikenai radiasi lagi maka elektron-elektron yang “terjebak” akan semakin banyak.

Ketika radiasi berinteraksi dengan materi, memungkinkan energi terimpartasi ke elektron yang menyebabkan elektron bergerak dari pita valensi ke pita konduksi sehingga elektron terlepas dari pasangannya yaitu *electron hole*. Kuantitas energi yang diterima ini tergantung pada perbedaan energi antara pita valensi dan konduksi. *Electron hole* ini bergerak bebas di dalam pita valensi sampai bergabung kembali atau satu diantaranya jatuh ke dalam trap, ketika bergabung kembali, elektron melepaskan foton. Jika penggabungan terjadi langsung setelah eksitasi materi disebut fluoresensi. Jika elektron atau *hole* yang terperangkap itu membawa energi (dan waktu) untuk rekombinasi dan materi disebut fosforesensi. Suatu materi berpendar dengan lambat pada temperatur ruang, tetapi dapat berpendar dengan cepat jika dipanaskan disebut dengan termoluminesensi. Ini mekanisme pada prinsip dasar TLD. Kristal TL yang diradiasi menyimpan energi dalam bentuk pasangan *electron-hole* sampai dipanaskan kemudian melepaskan energi itu dalam bentuk cahaya. Dalam senyawa kristal murni, elektron-elektron menempati orbital energi paling rendah yang diketahui sebagai pita valensi yang terpisah dari pita konduksi oleh “*forbidden band gap*”. *Forbidden band gap* adalah jangkauan energi suatu elektron dalam material murni yang tidak mengikuti prinsip mekanika kuantum.

Universitas Indonesia

Pada kenyataannya, kristal yang mengandung bahan pencemar dalam struktur lattice bertindak sebagai *electron trap*, yang mempunyai energi pada *forbidden band gap*. Ketika kristal terpapar radiasi seperti pada Gambar 2.6 energi yang diimpartasi ke elektron menariknya ke pita konduksi.



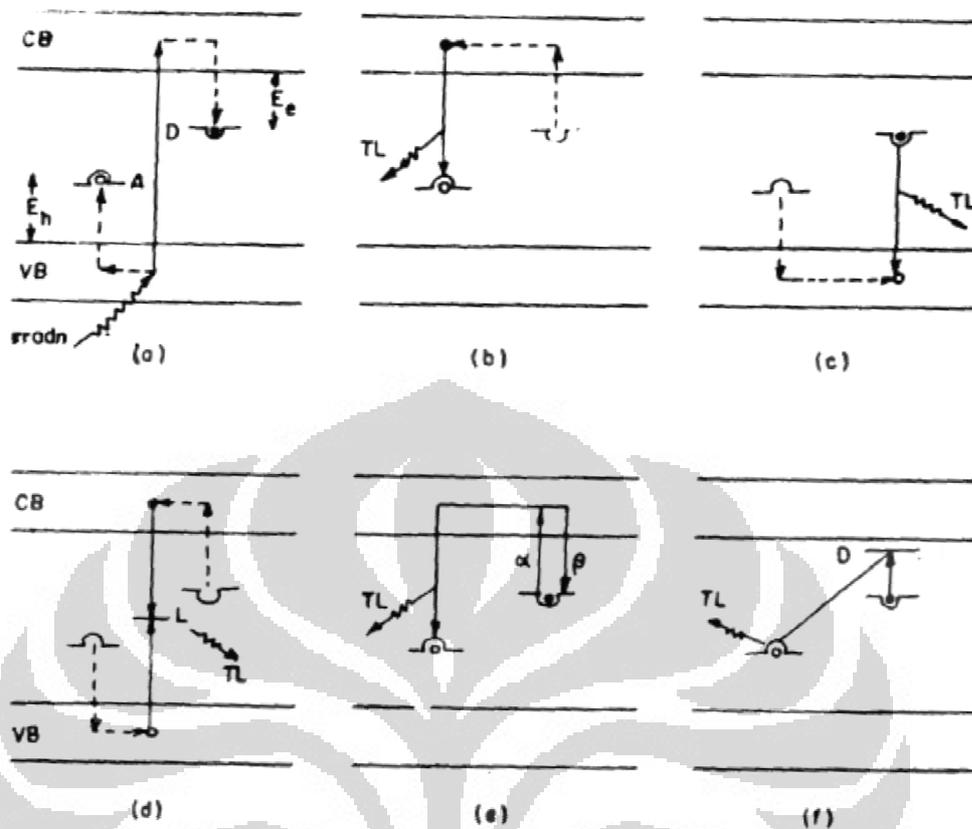
[Sumber : Wesley Leon Boyd, 2005]

Gambar 2.4 Gambaran model satu trap dan proses bagaimana elektron diproduksi dan diperangkap dan akhirnya dilepaskan untuk bergabung kembali dengan *electron hole*.

T adalah level energi *electron trap* dan E adalah beda energi antara trap dan pita konduksi. R adalah rekombinasi utama dimana elektron pembawa dan *electron hole* bergabung kembali.

Pada kristal murni, elektron akan segera mengemisi kelebihan energi ini dalam bentuk cahaya dan kembali ke pita valensi. Suatu elektron dalam pita energi *forbidden* masih dapat mengemisi energi dan bergabung dengan *hole* dalam pita valensi, tetapi terjadinya secara random dan bergantung pada beberapa faktor. Probabilitas rekombinasi bertambah dengan bertambahnya temperatur dan waktu dan berkurang untuk nilai E yang lebar yang berkaitan dengan beda energi antara trap dan level konduksi. (Ranogajec-Komor,2003, p.3). Oleh karena itu, E adalah energi yang dibutuhkan untuk melepaskan suatu elektron dari trap ke dalam pita konduksi. (Bos,2005, p.5).

Interaksi radiasi pengion dengan solid mengakibatkan transfer energi yang cukup ke elektron dalam pita valensi untuk berpindah ke pita konduksi. Proses ini biasanya membutuhkan energi sekitar 10 eV (tipe ionik kristal) dan diakibatkan oleh elektron sekunder yang dihasilkan dalam lingkungan yang utamanya foto-elektron dari partikel bermuatan. Sejumlah elektron-elektron yang dibebaskan langsung kembali ke keadaan dasar disertai dengan emisi cahaya (akibat fosforesensi/pemanasan internal). Meskipun fraksinya dapat ditangkap pada level donor D sesuai dengan *hole* pada level penerima A. Jika *trap* tidak sangat dalam, tidak menjebak dan rekombinasi mungkin dapat segera terjadi pada laju yang signifikan sekitar temperatur ruang berakibat waktu paruh penyimpanan energinya pendek. Ini biasanya dapat disebut fosforesensi tetapi temperatur ruang untuk termoluminisensi dijaga ketat. Hanya jika *trap* cukup dalam untuk menghasilkan kemampuan penyimpanan yang cukup pada RT (waktu paruh elektron *trap* pada beberapa bulan secara normalnya bersesuaian dengan temperatur puncak *glow* lebih besar dari 150⁰C.), menghasilkan efek yang baik. Tingkat pemberi atau penerima adalah keadaan metastabil dihubungkan dengan ketimpangan kristal (termasuk ketidakmurnian).



[Sumber : K.S.V Nambi, 1977]

Gambar 2.5 Diagram Model Pita untuk Proses TL Dalam Kristal, (a) Saat Terkena Radiasi, (b)-(f) Alternatif Proses Saat Dipanaskan.

❖ Kurva *Glow* Termoluminisensi

Ketika material TL dipanaskan, intensitas cahaya yang keluar tergantung pada jumlah rekombinasi. Fokus elektron pada *forbidden energi gap* berkaitan dengan kuantitas radiasi energi yang tersimpan dalam kristal dan dapat dikaitkan dengan dosis yang diterima oleh kristal. Material TL dibaca melalui pemanasan kristal dalam metode terkontrol untuk temperatur 300-400°C, memonitor cahaya yang keluar dengan *photomultiplier* dan diplot sebagai fungsi temperatur. Plot ini diketahui sebagai kurva *glow* dan berbeda untuk tiap tipe dosimeter.

Karakteristik material termoluminisensi

Material TL ideal akan menyimpan muatan pembawa yang terperangkap untuk periode waktu yang lama pada temperatur tertentu sebelum paparan, mempunyai cahaya keluaran yang luas, responnya linear diatas jangkauan dosis yang lebar, mampu *annealing* sempurna untuk dapat digunakan kembali, tergantung pada sudut atau tidak tergantung pada energi, cahaya keluarannya tidak berbeda diantara TLD individual.

Hilangnya muatan pembawa selama waktu tertentu disebut *fading*, hilangnya sinyal TL secara tidak sengaja. (Bos,2001, p.18). Ini penting karena muatan pembawa sebagai penggabung sehingga cahaya keluaran akan berkurang ketika fosfor TL dibaca, dibawah rata-rata dosis sebenarnya.

Dosimeter ideal juga akan mempunyai cahaya keluaran yang lebar bersesuaian dengan dosis. Fosfor dengan cahaya keluaran yang lebar akan lebih sensitif untuk dosis rendah lebih banyak cahaya foton yang diemisi melalui rekombinasi pasangan *electron-hole*, membuat lebih mudah untuk membedakan cahaya keluaran dari iradiasi cahaya yang diemisi oleh radiasi benda hitam kristal ketika dipanaskan.

Pada dosis rendah, termoluminisensi suatu materi meningkat secara linear terhadap dosis. (Charalambous & Petridou, 1976, p. 441). Mudah untuk mengkorelasikan keluaran TL terhadap dosis selama hubungannya linear, tetapi lebih banyak muatan pembawa yang terjadi dalam fosfor, fosfor menjadi lebih sensitif terhadap radiasi sehingga kurva respon dosis menjadi supralinear. Pada dosis yang sangat tinggi, material TL tersaturasi dan hubungan keluaran TL/ dosis menjadi sublinear sehingga fosfor kurang sensitif terhadap radiasi.

Annealing fosfor TL dilakukan segera setelah kristal dipanaskan dan dibaca. Tujuan *annealing* adalah untuk mengosongkan semua trap sehingga tidak ada sisa pasangan *electron-hole* yang dapat direkombinasi sebagai bacaan fosfor TL. *Annealing* juga akan menentukan kembali keseimbangan termodinamika yang timpang yang sudah ada dalam material sebelum iradiasi dan pembacaan. (Bos,

2001, p.17). Fosfor TL diradiasi dan *diannealing*, jumlahnya berkurang dan kurang sensitif terhadap paparan radiasi karena efek kerusakan dan kekosongan secara termal tidak terhubung dengan *trap*.

Secara ideal, pemilihan material TLD dan desain sistem TLD (*reader* dan dosimeter) sebaiknya dibuat dengan tujuan mengoptimalkan karakter sebagai berikut :

- *Zero dose reading (background)* – ini adalah bacaan terkecil dari material dan didasarkan pada bacaan sesaat setelah *annealing*. Kontribusi radiasi ambang pada bacaan ini dapat diabaikan. Sinyal infra merah dan arus PMT yang memungkinkan sebagai kontributor yang berarti. Ketika nilai ini ditampilkan dalam unit paparan atau dosis, nilai ini akan menjadi fungsi sensitifitas sebagian besar material.
- Sensitifitas (per unit massa atau per *chip*) – Kuantitas cahaya yang keluar per unit massa per unit paparan. Karena kebanyakan TLD reader tidak dikalibrasi untuk cahaya yang keluar secara langsung, cahaya yang keluar itu biasanya ditampilkan dalam muatan yang terkumpul pada PMT.
- *Reproducibility* – biasanya ditunjukkan sebagai standar deviasi nilai bacaan yang diulang diperoleh dari dosimeter atau chip yang sama, ketika diberikan dosis yang sama. *Reproducibility* tergantung pada luas jangkauan alat pembaca dan metode dan biasanya lebih baik dengan pemanasan secara linear dan dengan pemanasan tanpa kontak (gas panas atau pemanasan infra merah). *Reproducibility* juga tergantung pada tingkat dosis. *Reproducibility* pada tingkat dosis lebih dari 10 kali bacaan background sebagian besar akan lebih baik dari pada tingkat dosis mendekati bacaan background. Untuk alasan ini, periode monitoring sebaiknya digunakan untuk memastikan suatu sinyal itu bagus sekitar bacaan dosis *background*.
- Deteksi ambang – tingkat dosis yang secara signifikan berbeda dari background dan akan dideteksi dengan baik oleh sistem yang diberikan.
- Linearitas - suatu tingkatan untuk ditunjukkan dan diberikan nilai paparan yang sesuai dengan jangkauan dosis yang akan digunakan sistem.

Universitas Indonesia

- *Fading* - hilangnya sinyal dengan waktu setelah iradiasi (*post-irradiating fading*) atau hilangnya sensitifitas sebelum iradiasi (*pre-irradiating fading*). Akibat dari keduanya adalah sinar keluaran per unit paparan lebih kecil dengan waktu yang lama antara anneal dan bacaan. *Fading* dapat disebabkan karena paparan oleh cahaya (*optical fading*) atau panas (*thermal fading*).
- Ketergantungan energi – tingkatan dimana sinyal termoluminisensi secara langsung proporsional dengan nilai yang diukur (paparan atau dosis serap di udara atau di jaringan) melebihi jangkauan energi yang dikehendaki untuk diukur.
- Sensitifitas cahaya – tingkatan dimana cahaya tampak mempengaruhi respon TLD untuk radiasi atau menghasilkan respon sendiri dalam materi TLD. Sensitifitas cahaya dapat dibawa dari pengurangan sinyal yang diambil dari paparan yang diterima atau sinyal awal dalam *chip* saat tidak diberikan radiasi.
- Sensitifitas kelembaban – tingkatan dimana kelembaban mempengaruhi respon materi TLD untuk radiasi dan atau tingkatan dimana materi merespon secara langsung terhadap kelembaban.

Pemilihan material TLD didasarkan pada struktur kristal, atau kedalaman trap dan nomor atom materi. Materi seperti LiF:Mg:Ti dan CaSO₄:Dy lebih cocok untuk paparan yang lama karena sinyal fading terkecilnya berada pada temperatur ambang.

❖ LiF:Mg,Ti

Lithium fluorida didoping dengan magnesium dan titanium (LiF:Mg,Ti) paling sering digunakan sebagai material TLD karena jangkauan dosisnya luas, stabilitas materialnya bagus dan perkiraan sifatnya ekuivalen jaringan. Ada tiga tipe dosimeter yang dibuat dari LiF:Mg,Ti dikenal dengan TLD-100, TLD-600 dan TLD-700. Ketiga TLD tersebut mempunyai sifat kimia yang sama yang berarti responnya sama untuk foton dan radiasi partikel bermuatan, tetapi pada

dasarnya sifat intinya sangat berbeda. TLD-100 disusun dari lithium alami yang mempunyai konsentrasi isotop 92,6% ${}^7\text{Li}$ dan 7,4% ${}^6\text{Li}$.

Beberapa kristal yang sering digunakan dalam TLD beserta nama komersialnya.

Tabel 2.1 Nama Kristal TLD Beserta Nama Komersialnya

No.	Nama Kristal TLD	Nama komersial
1.	Li:Mg,Ti	TLD-100
2.	${}^6\text{Li}$:Mg,Ti	TLD-600
3.	${}^7\text{Li}$:Mg,Ti	TLD-700
4.	CaF_2 :Dy	TLD-200
5.	CaF_2 :Tm	TLD-300
6.	CaF_2 :Mn	TLD-400
7.	Al_2O_3 :C	TLD-500
8.	CaSO_4 :Dy	TLD-900

Faktor yang berpengaruh terhadap respon TLD dalam pengukuran dosis serap :

- Variasi respon TLD dari materi satu dengan yang lainnya.
- Perbedaan periode *fading* TLD antara satu materi dengan yang lain.
- Prosedur penyimpanan (seperti TLD dijaga dari ultra violet lingkungan secara langsung sebelum pengukuran, menggunakan penjepit vakum untuk memindahkan TLD), jika tidak mengikuti prosedur yang selayaknya sebelum kalibrasi TLD mungkin bisa mempengaruhi respon TLD.
- Respon intrinsik *TLD reader* bisa juga mempengaruhi respon dosimeter secara umum.
- *Annealing* dilakukan dalam menyiapkan TLD untuk digunakan kembali dapat juga mempengaruhi pengukuran seperti tata cara *annealing* yang berbeda dari material TL satu dengan lainnya.

Dosimetri TLD dianggap sebagai *black art*. Untuk beberapa, TLD menghasilkan hasil yang sangat baik dengan akurasi yang tinggi tetapi untuk beberapa yang lain, semua upaya kelihatannya gagal.

Karakteristik terpenting material termoluminisensi untuk digunakan sebagai dosimeter dalam pemonitor radiasi, seperti personal, lingkungan dan dosimetri radiasi, sebagai berikut :

- Sensitifitas tinggi, emisi TL tinggi untuk dosis radiasi yang sangat rendah.
- Ekuivalen jaringan, harus mempunyai nomor atom efektif Z_{eff} sebanding dengan nomor atom jaringan lunak ($Z_{\text{eff}} = 7,4$)
- Mempunyai emisi TL yang sederhana, struktur kurva *glow* dengan puncak yang dapat ditentukan dengan baik.
- Mempunyai respon TL yang sangat stabil terhadap waktu, laju *fading* dapat diabaikan.

LiF:Mg,Ti diproduksi oleh Harshaw Company (U.S) dengan nama komersial TLD-100, salah satu yang terkenal dan dosimeter TL yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi. TLD-100 mempunyai nomor atom efektif sama dengan 8,14, salah satu yang sangat cocok untuk jaringan manusia. Namun, sebelum digunakan kembali butuh dilakukan *annealing* yang kompleks. Dalam banyak kasus perlu *annealing* setelah diradiasi untuk pembersihan, sebelum dibaca, puncak-puncak temperatur rendah dapat memberikan *uncertainty* yang besar dalam pengevaluasian dosis karena fading pada temperatur ruang.

❖ Alat Pembaca TLD

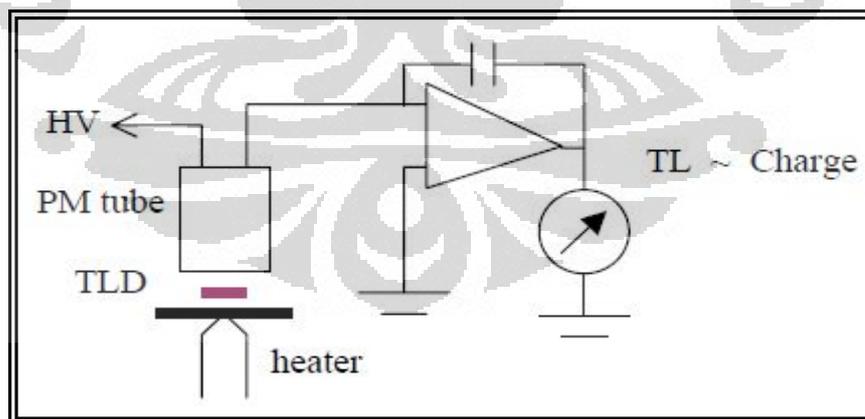
Termoluminisensi diukur dengan suatu alat yang dinamakan *TLD reader*. Sistem dasar *TLD reader* terdiri dari *planchet* untuk menempatkan dan memanaskan TLD, *photomultiplier tube* (PMT) untuk mendeteksi emisi cahaya termoluminisensi dan mengkonversinya ke dalam sinyal listrik yang proporsional secara linear untuk mendeteksi *fluence* foton dan elektrometer untuk mencatat sinyal PMT sebagai muatan atau arus. Skema diagram dasar *TLD reader* ditunjukkan dalam Gambar 2.6.

Fosfor yang telah diradiasi harus dipanaskan untuk memunculkan emisi luminisensi. Semua instrumentasi pembaca TLD terdiri dari komponen dasar berikut :

- Pemanas dan unit control temperatur
- Susunan mekanikal untuk penempatan fosfor pada *heating pan* atau kedalam rangkaian pemanas dalam *dark chamber*.
- Detektor luminisensi dengan filter optik.
- Sumber tegangan.
- *Read out*.

Unit pemanas harus menghasilkan temperatur maksimum pada kurva *glow* secepat mungkin tanpa latar belakang infra merah.

Saat ini TLD sering digunakan metode dosimetri untuk dosimetri individual rutin, monitor lingkungan dan dosimetri radiasi klinik. Dibanyak negara metode film badge diganti dengan TLD tidak hanya dalam radiasi nuklir tetapi juga dalam pelayanan dosimetri personal nasional. Metode keduanya, film badge dan TLD paling banyak digunakan untuk dosimetri personal jika proses evaluasi dosis dijaga dengan kontrol yang sesuai kemudian akurasi kedua metode secara umum memenuhi syarat monitor perorangan.



[Sumber : E.B Podgorsak, 2005]

Gambar 2.6 Skematik Diagram *TLD Reader*

Sinyal termoluminisensi adalah keseluruhan jumlah foton yang dihitung atau total muatan yang terkumpul pada suatu interval waktu dalam rangkaian PMT ketika TLD *chip* dipanaskan. Emisi intensitas termoluminisensi merupakan fungsi temperatur TLD. Laju pemanasan yang dijaga konstan membuat temperatur proporsional dengan waktu dan intensitas termoluminisensi dapat diplot sebagai fungsi waktu jika pencatat keluaran terdapat pada sistem pengukuran TLD. Hasil kurvanya dinamakan kurva *glow* TLD. Puncak-puncak pada kurva *glow* dapat dikorelasikan dengan kedalaman trap dapat merespon emisi termoluminisensi.

Puncak dosimetri utama kurva *glow* LiF:Mg,Ti antara 180°C dan 260°C digunakan untuk dosimetri. Temperatur puncaknya cukup tinggi sehingga tidak dapat dipengaruhi oleh temperatur ruang dan masih cukup rendah sehingga tidak terganggu emisi benda hitam dari *planchet* pemanas. Sinyal termoluminisensi total yang diemisikan (daerah dibawah porsi yang sesuai dari kurva *glow*) dapat dikorelasikan untuk dosis setelah kalibrasi.

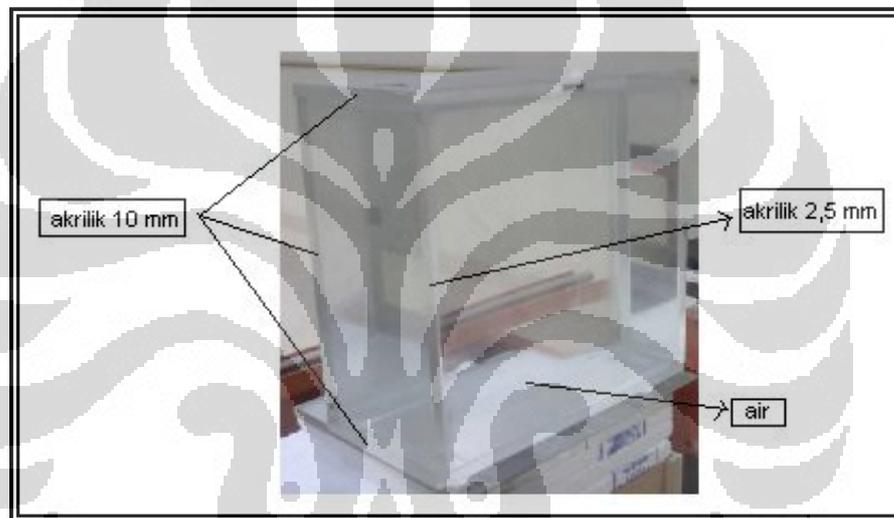
Reproduksibilitas siklus pemanasan yang baik sebelum pembacaan sangat penting untuk keakuratan dosimetri. Sinyal termoluminisensi berkurang seiring waktu setelah iradiasi karena emisi spontan cahaya pada temperatur ruang. Proses ini disebut *fading*.

2.5 Fantom

Merupakan objek yang digunakan untuk menyerap dan atau ekuivalen radiasi hambur untuk pasien sehingga digunakan untuk membantu perkiraan dosis radiasi dan uji sistem pencitraan tanpa penyinaran pasien yang sebenarnya. Fantom menyerupai manusia atau objek fisik yang diuji dan terbuat dari materi yang ekuivalen jaringan. Ekuivalen jaringan adalah suatu bahan yang sifat penyerapan dan hamburannya untuk radiasi dengan jenis dan energi tertentu menyerupai sifat yang ada pada jaringan biologi.[Eri Hiswara, 1994]. Fantom adalah model matematis atau fisis yang digunakan untuk simulasi karakteristik interaksi radiasi tubuh manusia atau hewan.

2.5.1 ISO water slab phantom

Fantom yang digunakan untuk mewakili tubuh manusia dengan menganggap hamburan balik radiasi adalah *ISO water slab phantom* dengan kedalaman 30 cm x 30 cm x 15 cm. Fantom ini merupakan fantom standar untuk kalibrasi dosimetri personal. Bagian permukaan depan fantom terdiri dari plat PMMA dengan ketebalan 2,5 mm dan sisi lain dari fantom dengan ketebalan PMMA adalah 10 mm serta bagian tengah berisi air. PMMA adalah polymethyl methacrylate dengan densitas $1,19 \text{ g/cm}^3$ dan komposisi massanya 8,05% H, 59,99% C dan 31,96% O.



Gambar 2.7 Fantom *ISO Water Slab*

2.6 Kualitas Radiasi Standar RQR

Kemampuan berkas radiasi sinar-x dalam menembus suatu bahan dinyatakan sebagai kualitas berkas. Kualitas berkas dinyatakan dalam *Half Value Layer* (HVL) sebagai ketebalan bahan standar untuk mengurangi intensitas berkas menjadi setengah intensitas awal. Kualitas radiasi *Radiation Qualities in Radiodiagnostic* (RQR) adalah kualitas radiasi yang diaplikasikan pada pasien radiografi konvensional, fluoroskopi dan dental.

Tabel 2.2 Kualitas Radiasi Rentang RQR

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung Sinar-X (kV)	HVL (mmAl)	Koefisien Homogenitas (h)
RQR 2	40	1,42	0,81
RQR 3	50	1,78	0,76
RQR 4	60	2,19	0,74
RQR 5*	70	2,58	0,71
RQR 6	80	3,01	0,69
RQR 7	90	3,48	0,68
RQR 8	100	3,97	0,68
RQR 9	120	5,00	0,68
RQR 10	150	6,57	0,72

*Nilai ini diseleksi secara umum sebagai kualitas radiasi referensi untuk berkas tidak teratenuasi pada aplikasi radiografi konvensional.

[Sumber : *International Atomic Energy Agency*, 2007]

2.7 Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder

Standar sekunder adalah nilai yang ditetapkan melalui perbandingan langsung dengan standar primer dan disertai dengan sertifikat dokumen yang dapat dirunut. Standar sekunder dipertahankan oleh Standar Sekunder Dosimetri IAEA.

Dalam beberapa situasi, perlu diperhatikan untuk membuat pengukuran secara langsung pada pasien. Meskipun lebih baik untuk membuat pengukuran menggunakan fantom standar dengan simulasi pasien untuk kontrol parameter teknik, untuk perbandingan sistem yang berbeda dan untuk pengoptimalan. Variasi teknik pengujian digunakan dalam diagnostik sinar-x. Dosimeter yang dibutuhkan, desain dan pelaksanaannya harus sesuai untuk kebutuhan pengukuran klinik. Penggunaan dosimeter dan interpretasi hasil yang diperoleh sesuai dengan

teknik dan pengetahuan yang dibutuhkan, semuanya itu harus ada untuk standar prosedur untuk pengukuran dosis dalam klinik.

IAEA menjamin pengukuran radiasi yang dapat dirunut melalui jaringan Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder (SSDL) IAEA/WHO. Saat ini, metode yang digunakan dalam kalibrasi pada kualitas radiasi diagnostik sudah tidak dikoordinasi lagi. Banyak laboratorium menggunakan kualitas dan standar radiasi yang berbeda, beberapa mungkin tidak sesuai. Kontrol kualitas hanya dapat dikerjakan dengan memuaskan jika dibuat koreksi kalibrasi dan pengukurannya. Saran ini dibutuhkan untuk menuntun laboratorium dan kemungkinan untuk bekerja sama suatu saat.

Di seluruh dunia, hanya ada 20 negara dengan PSDL yang terlibat dalam dosimetri radiasi dan institusi itu tidak dapat mengkalibrasi dosimeter radiasi yang jumlahnya sangat banyak yang digunakan di seluruh dunia. Peranan utama SSDL adalah untuk menjembatani antara PSDL dan pengguna radiasi pengion dengan memungkinkan peralihan kalibrasi dari standar primer ke pengguna peralatan. SSDL menyebarkan kalibrasi pada kualitas radiasi spesifik yang sesuai untuk penggunaan peralatan dan pengaruh pernyataan tentang ketidakpastian kalibrasi. Di banyak negara, SSDL menyediakan pelayanan yang ahli dalam dosimetri untuk pengguna di rumah sakit dan institusi lain dalam aplikasi radiasi pengion. Di beberapa negara, peranan SSDL adalah untuk memenuhi akreditasi laboratorium kalibrasi sekunder.

Diwajibkan bahwa untuk laboratorium mempunyai standar sekunder yang dikalibrasi pada PSDL, berpartisipasi dalam perbandingan dan dikuasakan untuk aktifitas ini melalui badan metrologi nasional.

SSDL difokuskan utamanya pada kalibrasi instrumentasi untuk menggunakan pengukuran dosis dalam radiasi terapi dan proteksi radiasi dan kurang diperhatikan untuk kalibrasi instrumentasi yang digunakan untuk pengukuran dosimetri dalam radiologi diagnostik. Ini sebagian besar karena kurangnya permintaan pada waktu yang lalu. Kenaikan permintaan, utamanya

karena kebutuhan untuk menentukan program *quality assurance* di rumah sakit, sehingga sekarang dibutuhkan pengembangan pelayanan kalibrasi.

2.8 Standar Radiologi Diagnostik

2.8.1. Standar *air kerma*

Setiap PSDL menggunakan *ionization chamber* untuk satuan kerma udara pada berkas sinar-x energi rendah dan medium. Perbedaan desain, tipe *plane parallel* dan silinder juga digunakan. Air kerma ditentukan oleh BIPM digunakan sebagai kunci perbandingan nilai referensi yang sangat penting.

2.8.1.1. *Incident air kerma/ Dosis di udara*

Dosis di udara, K_i adalah kerma udara dari suatu berkas yang diukur saat terjadinya sinar-x pada pusat axis berkas di posisi pasien atau permukaan fantom. Hanya radiasi yang mengenai pasien atau fantom dan radiasi hamburan balik tidak termasuk di dalamnya. Satuan : J/kg. Nama satuan kerma adalah Gray(Gy).

2.8.1.2. *Entrance surface air kerma/ Dosis Permukaan*

Dosis di permukaan, K_e adalah kerma udara yang diukur pada pusat axis berkas di posisi pasien atau permukaan fantom. Radiasi pada pasien atau permukaan fantom dan radiasi backscatter termasuk di dalamnya. Satuan : J/kg. Nama satuan kerma adalah Gray (Gy). Dosis permukaan berkaitan dengan dosis di udara dengan adanya faktor hamburan balik, B (TRS No457, 2007) :

$$K_e = K_i \cdot B \quad (2.1)$$

2.9 Kalibrasi Alat Ukur

Kalibrasi alat ukur radiasi adalah tindakan membandingkan alat tersebut terhadap alat ukur radiasi standar atau tindakan menyinari alat tersebut dalam medan radiasi yang telah diketahui keadaannya melalui sumber standar atau alat ukur radiasi standar. Titik pengujian adalah titik dimana titik acuan peralatan ditempatkan untuk tujuan kalibrasi atau tipe pengujian dan secara konvensional alat ukur yang digunakan diketahui benar.

Sudah merupakan suatu ketentuan bahwa setiap alat ukur proteksi radiasi harus di kalibrasi secara periodik oleh instansi yang berwenang. Hal ini dilakukan untuk menguji ketepatan nilai yang ditampilkan alat terhadap nilai sebenarnya. Perbedaan nilai antara yang ditampilkan dan yang sebenarnya harus dikoreksi dengan suatu parameter yang disebut faktor kalibrasi (F_k). Dalam melakukan pengukuran, nilai yang ditampilkan alat harus dikalikan dengan faktor kalibrasinya. Secara ideal, faktor kalibrasi ini bernilai satu, akan tetapi pada kenyataannya tidak banyak alat ukur yang mempunyai faktor kalibrasi sama dengan satu. Nilai yang masih dapat diterima berkisar antara 0,8 sampai dengan 1,2.[Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2008]

Terdapat dua metode untuk melakukan kalibrasi yaitu menggunakan sumber radiasi standar dan menggunakan alat ukur standar. Cara pertama, alat ukur diletakkan pada jarak tertentu, misalnya 1 m, dari sumber standar yang telah diketahui jenis nuklida maupun aktivitasnya. Dosis paparan yang mengenai dosimeter ditentukan berdasarkan perhitungan. Cara kedua, alat ukur yang akan dikalibrasi dan alat ukur standar diletakkan pada jarak yang sama dari suatu sumber sehingga dosis radiasi yang mengenai dua alat ukur tersebut sama. Nilai dosis radiasi yang ditampilkan oleh alat ukur standar dianggap sebagai dosis sebenarnya.[Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2008].

2.9.1 Koefisien Kalibrasi

Nilai koefisien kalibrasi detektor dapat ditentukan dengan perhitungan seperti :

$$N_k = \frac{M_{(standar)} \times N_{k(standar)}}{M_{diuji}} \quad (2.2)$$

Keterangan : N_k = koefisien kalibrasi

M = hasil bacaan detektor.

Koefisien kalibrasi merujuk pada kondisi referensi yang digunakan pada laboratorium dan ini merupakan rasio kuantitas nilai kebenaran konvensional untuk mengukur nilai yang ditunjukkan.

Universitas Indonesia

2.9.2 Kondisi Referensi

Kondisi referensi mewakili seperangkat nilai (nilai referensi) yang mempengaruhi kuantitas koefisien kalibrasi agar valid tanpa koreksi lebih lanjut. Contoh yang mempengaruhi kuantitas kalibrasi untuk *air kerma* adalah kualitas berkas, temperatur disekitarnya, tekanan udara dan kelembaban relatif, arah terjadinya radiasi dll.

Kondisi pengukuran biasanya tidak sesuai dengan kondisi referensi yang digunakan dalam laboratorium standar, dibutuhkan koreksi tambahan untuk kondisi referensi digunakan pada laboratorium untuk efek pengaruh kuantitas.

Kuantitas-kuantitas yang berpengaruh ini didefinisikan kuantitas-kuantitas bukan subyek pengukuran dan belum dapat mempengaruhi hasil pengukuran, hanya berbeda secara alami sebagai contoh tekanan dan temperatur sekitar, hal ini dapat muncul dari dosimeter (misal kebocoran, *zero drift*, *warm-up*) atau dapat berupa kuantitas yang berhubungan dengan medan radiasi (missal kualitas berkas, laju dosis, ukuran lapangan, keberadaan radiasi hambur). Kuantitas-kuantitas yang berpengaruh ini dapat menghasilkan efek yang berbeda pada dosimeter dengan tipe yang berbeda. Sebagai contoh, respon dosimeter dengan detektor semikonduktor biasanya tidak dipengaruhi oleh perubahan tekanan atmosfer berbeda dengan ionisasi chamber yang dipengaruhi oleh tekanan atmosfer.

2.9.2.1 Faktor Koreksi Kualitas Berkas Radiasi

Faktor koreksi kualitas radiasi dapat ditentukan dengan rumus berikut (TRS No.457, 2007) :

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{K,Q}}{N_{K,Q_0}} \quad (2.3)$$

Keterangan : N_{K,Q_0} = koefisien kalibrasi detektor pada kualitas radiasi referensi

$N_{K,Q}$ = koefisien kalibrasi detektor pada kualitas radiasi tertentu

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penentuan koefisien faktor hamburan balik dari fantom ISO water slab dalam penelitian ini dilakukan pada kualitas radiasi *Radiation Qualities in Radiodiagnostic (RQR)* berdasarkan *Technical Reports Series No.457 "Dosimetry In Diagnostic Radiology : An International Code of Practice"*. Filter tambahan yang diperlukan untuk rentang kualitas radiasi RQR ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Filter tambahan kualitas radiasi RQR

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung sinar-x (kV)	HVL (mmAl)	Filter Tambahan (mmAl)
RQR 2	40	1,42	2,69
RQR 3	50	1,78	2,52
RQR 4	60	2,19	2,94
RQR 5*	70	2,58	2,83
RQR 6	80	3,01	3,1
RQR 7	90	3,48	3,31
RQR 8	100	3,97	3,35
RQR 9	120	5	3,8
RQR 10	150	6,57	4,26

*RQR 5 merupakan kualitas radiasi referensi.

[Sumber : Ainur Rahmi, 2010]

Kualitas radiasi RQR biasanya dinyatakan dalam energi rata-rata, seperti yang telah diketahui dalam tabel berikut ini :

Tabel 3.2 Energi Rata-rata untuk Kualitas Radiasi RQR

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung sinar-x (kV)	HVL (mmAl)	Energi Rata-rata (keV)
RQR 2	40	1,43	28,1
RQR 3	50	1,77	32,1
RQR 5*	70	2,54	39,6
RQR 6	80	2,99	43,4
RQR 7	90	3,45	46,9
RQR 8	100	3,98	50,2
RQR 9	120	4,98	55,8
RQR 10	150	6,55	63,5

[Sumber : Rahmat Andika, 2010]

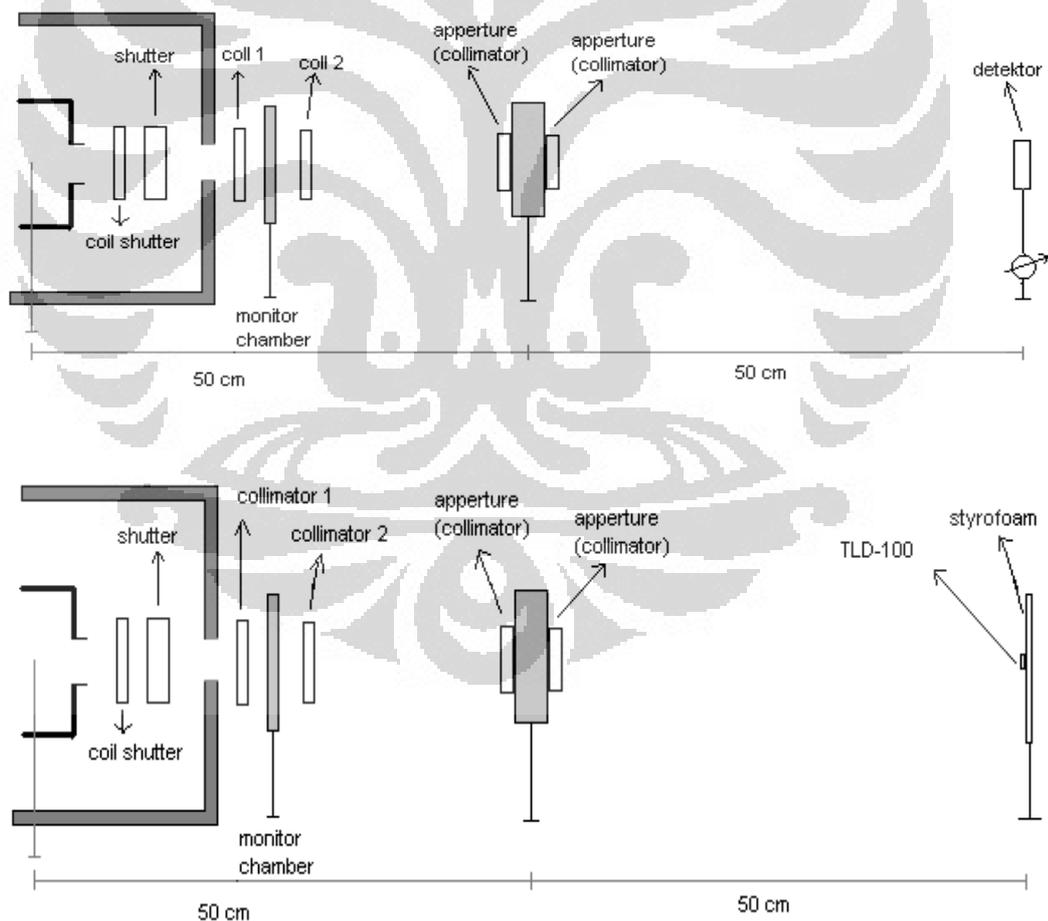
Penelitian ini didahului oleh persiapan pengelompokkan TLD dan kalibrasi yang bertujuan untuk menentukan koefisien faktor hamburan balik dari fantom *ISO water slab* pada kualitas radiasi RQR yaitu pengelompokkan TLD yang dilakukan oleh pihak BATAN Pasar Jumat dengan deviasi bacaan TLD $\pm 3\%$, kalibrasi yang pertama adalah kalibrasi TLD-100 di udara dengan detektor referensi Unfors Xi dan kalibrasi yang kedua adalah kalibrasi TLD-100 di permukaan fantom dengan detektor referensi Unfors Xi. Kalibrasi TLD dilakukan di Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder, BATAN Mampang. Sedangkan pembacaan TLD dilakukan di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN Pasar Jumat.

3.1 Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan untuk menentukan koefisien faktor hamburan balik adalah pesawat sinar-X Y.TU 320-D03 tipe 9421 12 32203 no.seri 60-2594 dan kontrol panel pesawat sinar-X, detektor Unfors Xi jenis *solid state* sebagai detektor standar, TLD-100 LiF:Mg:Ti yaitu TLD, filter tambahan Aluminium, kolimator , fantom *ISO water slab* ukuran 30 cm x 30 cm x 15 cm, monitor *chamber* PTW, elektrometer PTW Unidos untuk mengukur muatan atau arus yang diterima monitor *chamber* selama penyinaran.

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Kalibrasi TLD-100 LiF:Mg:Ti di Udara



Gambar 3.1 *Set-up* kalibrasi TLD di udara

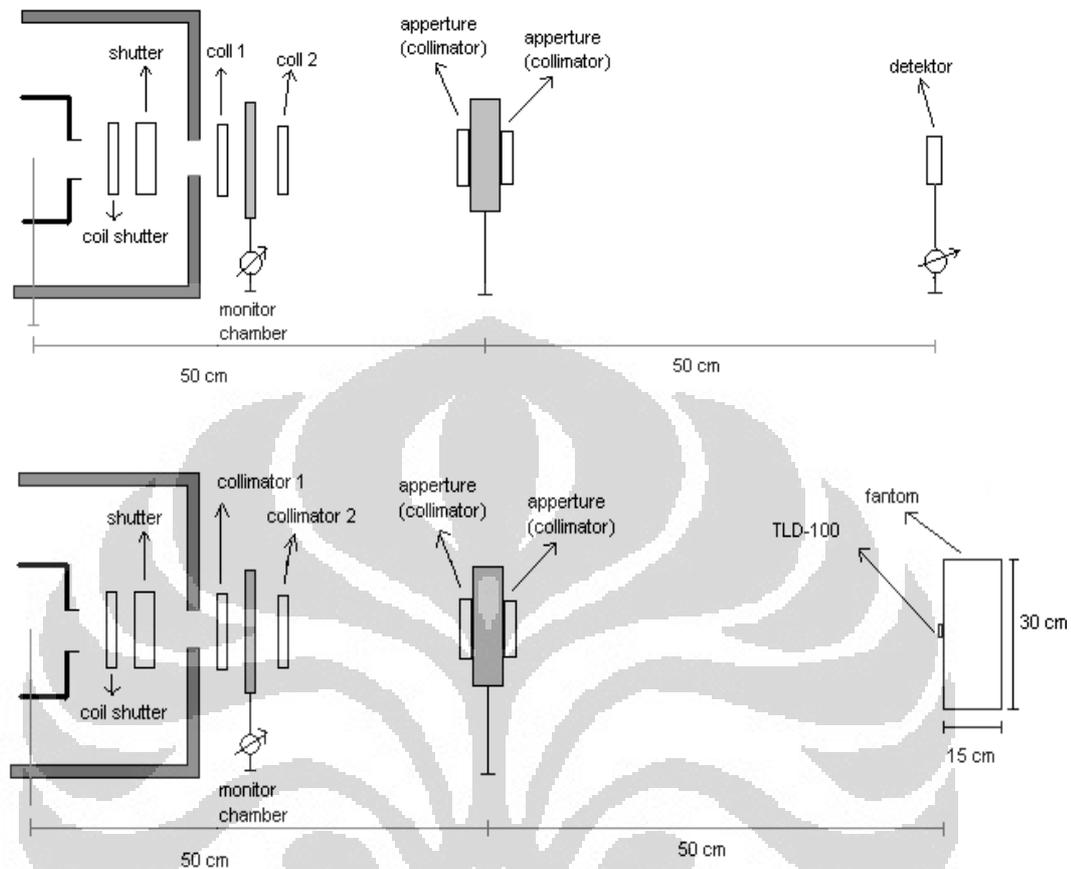
Set-up kalibrasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, letak detektor standar berada pada jarak 100 cm dari fokus tabung sinar-x dan TLD diletakkan di udara pada jarak yang sama dengan detektor standar Unfors Xi.

Penelitian ini menggunakan TLD-100 LiF:Mg:Ti. Untuk mengetahui respon TLD pada rentang kualitas radiasi RQR maka dosis yang diberikan pada saat penyinaran untuk setiap kualitas radiasi RQR nilainya harus sama. Pada penelitian ini digunakan dosis sekitar 10 mGy. Hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan waktu penyinaran TLD menggunakan detektor Unfors Xi. Waktu penyinaran TLD ditentukan setiap akan dilakukan penyinaran TLD di udara maupun dipermukaan.

Pengukuran pertama, TLD dan detektor standar diletakkan secara paralel pada jarak 100 cm dari fokus tabung sinar-x di udara seperti pada Gambar 3.1. Penyinaran dilakukan bergantian, yang pertama dengan detektor standar kemudian dengan TLD.

Pertama dengan detektor standar diambil sampel hasil penyinaran selama kurang lebih untuk berapapun waktu yang diberikan untuk setiap rentang RQR dan pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali. Hasil pengukuran dengan detektor Unfors tidak memerlukan koreksi tekanan udara dan temperatur karena detektor ini rigid sehingga langsung dapat diketahui laju dosisnya. Untuk memperoleh waktu penyinaran dengan dosis sekitar 10 mGy, maka 10 mGy dibagi dengan laju dosis. Kemudian, dilakukan pengukuran dengan detektor standar sesuai dengan waktu yang diperoleh melalui perhitungan. Jika hasil pengukuran dengan detektor standar sesuai dengan dosis yang diinginkan sekitar 10 mGy baru kemudian dilakukan penyinaran TLD dengan lamanya waktu sama dengan waktu yang digunakan pada pengukuran dengan detektor standar. Kalibrasi TLD dilakukan bergantian untuk tiap-tiap kualitas radiasi. Pembacaan TLD dikerjakan menggunakan *TLD Reader* yang ada di laboratorium BATAN Pasar Jumat.

3.2.2 Kalibrasi TLD-100 LiF:Mg:Ti di Permukaan Fantom



Gambar 3.2 *Set-up* Kalibrasi TLD di Permukaan Fantom

Pengukuran kedua, TLD dan detektor standar diletakkan pada jarak 100 cm dari fokus tabung sinar-x di permukaan fantom *ISO water slab* ukuran 30 cm x 30 cm x 15 cm seperti pada Gambar 3.2. TLD yang digunakan masih sama dengan TLD yang digunakan untuk penyinaran di udara. Teknik ini hampir sama dengan kalibrasi TLD di udara, hanya bedanya medium tempat meletakkan TLD. Setelah dilakukan penyinaran TLD di permukaan fantom pada rentang RQR, maka dilakukan pembacaan TLD menggunakan *TLD Reader* yang dibantu pihak Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi di laboratorium BATAN Pasar Jumat.

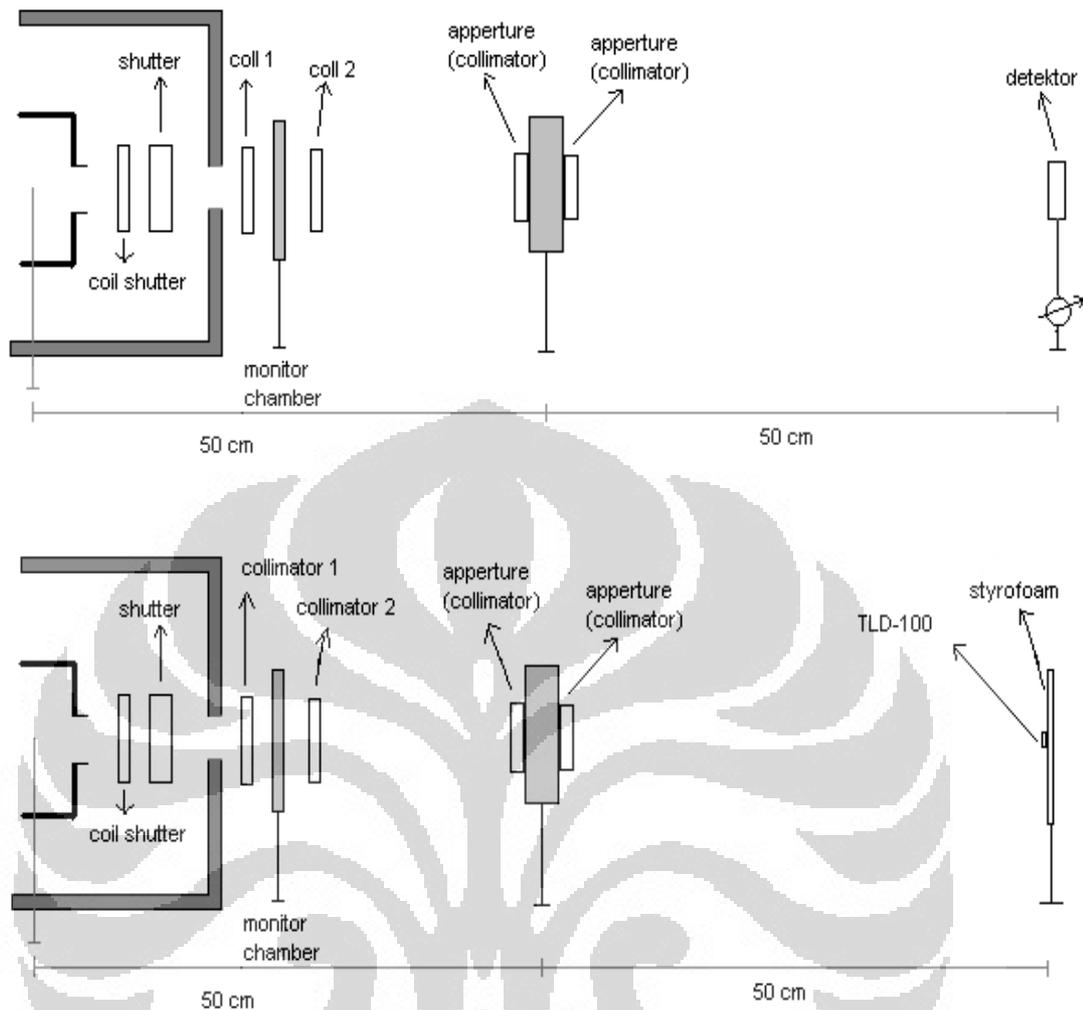
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penentuan Dosis di Udara

Sebelum melakukan kalibrasi TLD di udara dan di permukaan fantom, terlebih dahulu dilakukan pengelompokan TLD. Sebelumnya saya sudah melakukan kalibrasi TLD di udara menggunakan dua kelompok TLD dan kalibrasi di permukaan fantom untuk dua kelompok TLD yang sama dengan yang digunakan saat kalibrasi di udara sebanyak 90 buah TLD-100 untuk setiap kelompok. Akan tetapi, hasil bacaan yang diperoleh kurang sesuai karena deviasi bacaan TLD $\pm 5\%$ sehingga dari hasil bacaan ini dilakukan pengelompokan ulang TLD. Dari hasil bacaan di udara dan di permukaan fantom dipilih berdasarkan hasil bacaan di permukaan fantom karena hasil bacaan TLD di udara terlalu acak akibat kesalahan penggunaan penyangga TLD yang menyebabkan kemungkinan radiasi hambur yang besar mengenai TLD. Dari hasil bacaan TLD di permukaan fantom dipilih antara TLD kelompok 1 dan TLD kelompok 2, berdasarkan sensitivitas TLD dipilih TLD kelompok 1 sebanyak 67 buah. Oleh karena itu, TLD yang digunakan dalam kalibrasi sebanyak 67 buah.

Ketika dilakukan kalibrasi TLD di udara, diset dosis yang diberikan nilainya sama untuk setiap kualitas radiasi RQR yaitu sekitar 10 mGy. Hal ini dilakukan untuk mengetahui respon TLD-100 dalam rentang kualitas radiasi RQR. *Set-up* kalibrasi TLD-100 di udara dikerjakan seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Set-up* Kalibrasi TLD-100 di Udara

Detektor standar yang digunakan dalam kalibrasi TLD adalah detektor dioda Unfors Xi. TLD diletakkan pada titik pengujian atau sama dengan titik peletakkan detektor standar yaitu jarak 100 cm dari titik fokus tabung sinar-x seperti diilustrasikan pada Gambar 4.1. Dalam menentukan dosis sekitar 10 mGy, perlu dilakukan perhitungan waktu penyinaran TLD menggunakan detektor standar. Detektor standar yang digunakan merupakan detektor dioda Unfors Xi yang dapat secara langsung menyesuaikan dalam pengukuran dosis dengan perubahan kualitas berkas radiasi sehingga tidak memerlukan koreksi bacaan detektor k_{Q,Q_0} karena perubahan kualitas energi. Karena detektor mempunyai *shield* hamburan balik untuk melindungi detektor dari radiasi hamburan balik, maka diasumsikan bahwa *shield* menghalangi radiasi hamburan balik dan tidak

Universitas Indonesia

memerlukan koreksi lebih lanjut untuk menentukan *air kerma incident* (Ki). Detektor dioda Unfors Xi dirangkaikan dengan elektrometer Unfors dan faktor koreksi bacaan akibat perubahan kualitas energi telah diaplikasikan dalam elektrometernya. Oleh karena itu, elektrometer Unfors dapat langsung menampilkan nilai Ki (dalam mGy) dan perhitungan waktu penyinaran TLD dapat dilakukan dari hasil bacaan detektor dioda Unfors Xi. Berikut ini adalah verifikasi waktu penyinaran TLD di udara berdasarkan Ki yang diperoleh dengan Unfors Xi.

Tabel 4.1.1 Verifikasi Waktu Penyinaran TLD-100 di Udara Berdasarkan Ki

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung Sinar-X (kV)	HVL (mmAl)	Filter * Tambahan (mmAl)	Ki (mGy)	Deviasi Ki %
RQR 5	70	2,58	2,83	10,00	0
RQR 6	80	3,01	3,10	9,92	0,80
RQR 7	90	3,48	3,31	10,00	0
RQR 8	100	3,97	3,35	10,10	1,00
RQR 9	120	5,00	3,80	10,05	0,50
RQR 10	150	6,57	4,26	9,93	0,70

*[Sumber : Ainur Rahmi, 2010]

Tabel 4.1.1 menunjukkan persen deviasi dosis antara dosis yang terukur oleh rangkaian detektor Unfors Xi terhadap dosis yang diset 10 mGy, nilai deviasinya cukup rendah. Oleh karena itu, waktu penyinaran TLD di udara sudah sesuai.

Tabel 4.1.2 Koefisien Kalibrasi TLD dan Faktor Koreksi Kualitas Berkas TLD di Udara

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung (kV)	Energi* Rata-rata (keV)	Ki (mGy)	M _u (nC)	Nk _u (mGy/nC)	kQ
RQR 5	70	39,6	10,00	27,19±0,65	0,37±0,01	1,00±0,02
RQR 6	80	43,4	9,92	26,50±0,93	0,37±0,01	1,02±0,04
RQR 7	90	46,9	10,00	26,17±0,79	0,38±0,01	1,04±0,03
RQR 8	100	50,2	10,10	26,07±0,78	0,39±0,01	1,05±0,03
RQR 9	120	55,8	10,05	25,22±0,91	0,39±0,01	1,08±0,04
RQR 10	150	63,5	9,93	25,07±0,80	0,40±0,01	1,08±0,03

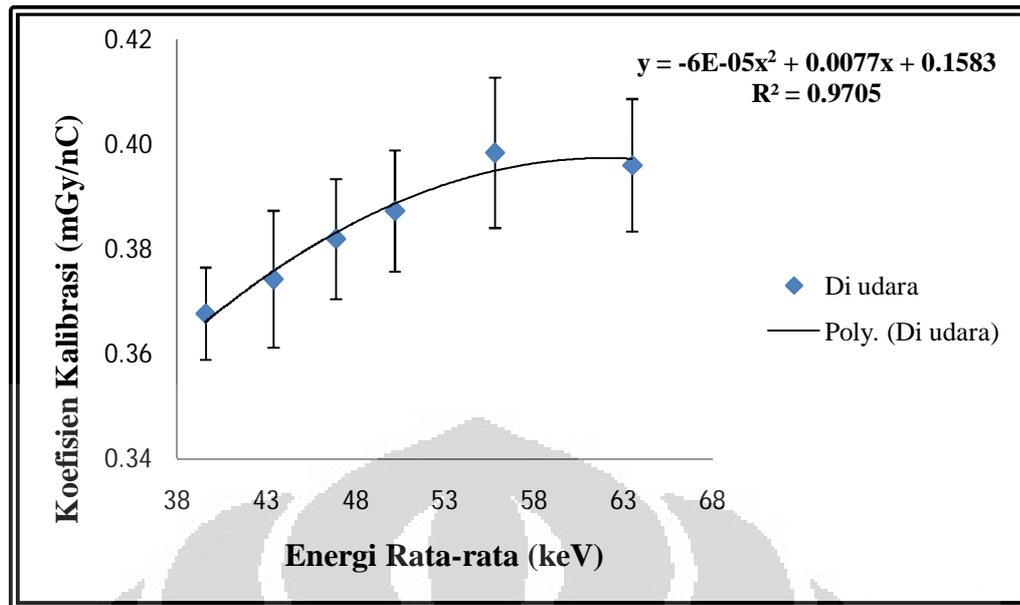
*[Sumber : Rahmat Andika, 2010]

Pada Tabel 4.1.2 diperoleh hasil bacaan TLD-100, M_u pada rentang (25,05±0,80 – 27,19±0,65) nC dan berdasarkan rentang energinya didapat deviasi bacaan secara keseluruhan adalah 3,14%. Pengelompokan TLD dilakukan untuk mendapatkan persen standar deviasi maksimal rata-rata bacaan TLD sekitar ±3%. Deviasi maksimum pengukuran untuk tiap-tiap kualitas radiasi berdasarkan standar deviasi keluaran pesawat sinar-x dari spesifikasi pabrik sebesar 2% dan persen standar deviasi rata-rata bacaan TLD maksimal 3% setelah dilakukan pengelompokan yaitu :

$$\text{Deviasi Pengukuran} = \sqrt{(\text{deviasi bacaan})^2 + (\text{deviasi keluaran pesawat})^2} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi maksimum} &= \sqrt{(3\%)^2 + (2\%)^2} \\ &= 3,6\% \end{aligned}$$

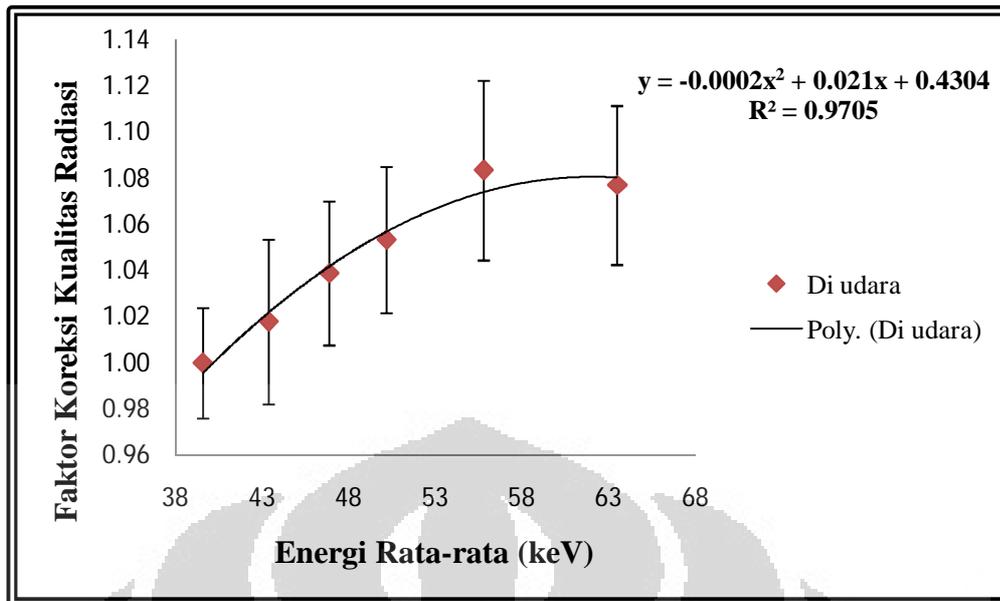
Deviasi maksimum pengukuran diperoleh dari jumlah kuadrat persen standar deviasi bacaan rata-rata TLD maksimal dan kuadrat deviasi keluaran pesawat sinar-x lalu diakar. Deviasi pengukuran yang diperoleh untuk tiap-tiap kualitas radiasi masih dibawah deviasi maksimum sehingga pengukuran radiasi dengan TLD-100 sesuai dengan standar. Hubungan antara koefisien kalibrasi TLD-100 terhadap energi rata-rata sinar-x pada Tabel 4.1.2 ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Koefisien Kalibrasi TLD-100 di Udara Terhadap Energi Rata-rata Sinar-x

Dari Gambar 4.2 diketahui nilai koefisien kalibrasi TLD, N_{k_u} yang meningkat dengan bertambahnya energi rata-rata. Koefisien kalibrasi merupakan koreksi bacaan TLD, M_u terhadap dosis yang diberikan berdasarkan detektor Unfors Xi. Hal ini berarti kemampuan TLD membaca radiasi yang sebenarnya membutuhkan koreksi yang lebih besar dengan bertambahnya energi rata-rata dalam rentang RQR.

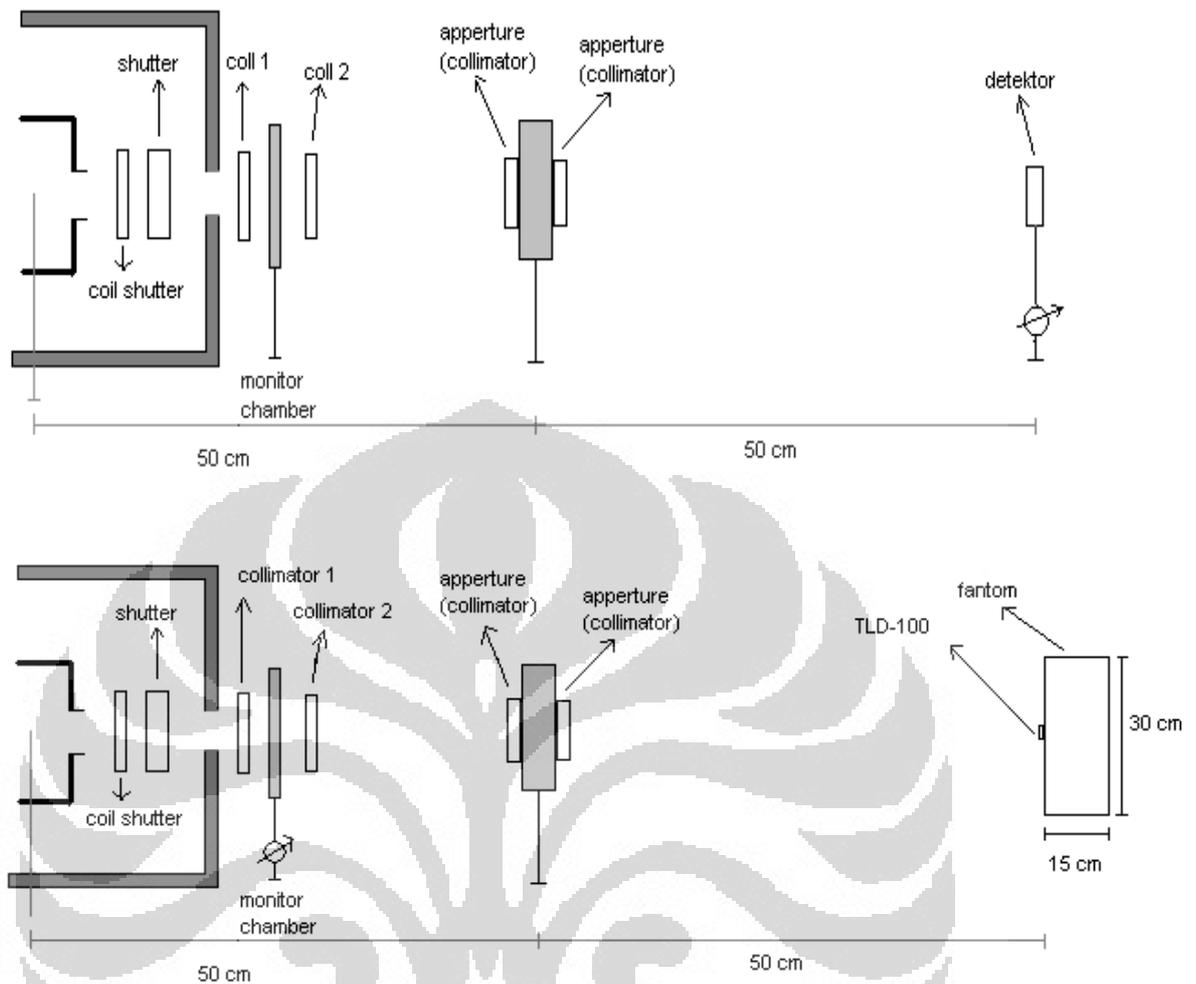
Karena koefisien kalibrasi TLD yang diperoleh, N_{k_u} bervariasi terhadap perubahan energi rata-rata radiasi sehingga bacaan TLD memerlukan koreksi kualitas radiasi, k_{Q_u} . Faktor koreksi kualitas berkas TLD ditunjukkan pada Tabel 4.1.2. Hubungan faktor koreksi kualitas berkas TLD-100 dari Tabel 4.1.2 terhadap energi rata-rata ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Faktor Koreksi Kualitas Berkas TLD-100 Terhadap Mean Energi Sinar-X

Gambar 4.3 menunjukkan faktor koreksi kualitas berkas TLD yang meningkat dengan bertambahnya energi rata-rata. Faktor koreksi kualitas berkas kQ merupakan koreksi kemampuan detektor merespon terhadap perubahan kualitas radiasi. Meningkatnya koefisien kalibrasi TLD dengan bertambahnya energi rata-rata seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 disebabkan oleh meningkatnya faktor koreksi kualitas berkas TLD dengan bertambahnya energi rata-rata.

Jika kalibrasi TLD diaplikasikan dipermukaan fantom, maka diperlukan koreksi hamburan balik untuk menentukan dosis TLD dipermukaan fantom, ESD untuk setiap kualitas radiasi RQR. *Set-up* kalibrasi TLD di permukaan fantom ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 *Set-up* Kalibrasi TLD-100 di Permukaan Fantom

Biasanya kalibrasi detektor untuk kualitas radiasi diagnostik dilakukan di udara. Seperti pada Gambar 4.1, radiasi yang diterima oleh detektor Unfors Xi merupakan *air kerma incident* (K_i) atau dosis di udara sehingga hasil bacaan TLD di udara dikoreksi dengan koefisien kalibrasi juga diperoleh dosis di udara. Jika kalibrasi dilakukan seperti pada Gambar 4.4, radiasi yang diterima TLD merupakan dosis di permukaan sedangkan dosis yang diterima oleh detektor Unfors Xi adalah dosis di udara atau K_i . Oleh karena itu, penentuan faktor hamburan balik perlu dilakukan untuk menentukan dosis TLD di permukaan fantom.

4.2 Penentuan Faktor Hamburan Balik Pada Rentang RQR

Kalibrasi TLD di permukaan fantom seperti pada Gambar 4.4, diset dosis yang diberikan sekitar 10 mGy menggunakan detektor dioda Unfors Xi. TLD yang digunakan dalam kalibrasi ini sama dengan TLD yang digunakan pada saat kalibrasi TLD di udara. Perhitungan waktu penyinaran TLD menggunakan detektor Unfors Xi. Verifikasi waktu penyinaran TLD di permukaan fantom ditunjukkan pada Tabel 4.2.1.

Tabel 4.2.1 Verifikasi Waktu Penyinaran TLD-100 di Permukaan Fantom Berdasarkan Ki

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung Sinar-X (kV)	HVL (mmAl)	Filter* Tambahan (mmAl)	Ki (mGy)	Deviasi Ki %
RQR 5	70	2,58	2,83	10,31	3,05
RQR 6	80	3,01	3,10	10,26	2,58
RQR 7	90	3,48	3,31	9,91	0,85
RQR 8	100	3,97	3,35	10,12	1,25
RQR 9	120	5,00	3,80	10,18	1,77
RQR 10	150	6,57	4,26	9,80	1,99

*[Sumber : Ainur Rahmi, 2010]

Persen deviasi Ki yang diperoleh pada Tabel 4.2.1 antara 0,85% - 3,05%. Keluaran pesawat sinar-x memang setiap saat berubah-ubah sehingga Ki yang terukur oleh detektor Unfors Xi tidak tepat 10 mGy, tetapi masih mendekati 10 mGy. Oleh karena itu, Ki yang terukur oleh detektor Unfors dapat digunakan untuk menghitung waktu penyinaran TLD di permukaan fantom.

Hasil bacaan TLD di permukaan fantom, M_f yang diperoleh lebih besar dari hasil bacaan TLD di udara, M_u sehingga dapat diperoleh nilai faktor hamburan balik, BSF seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2.2. Faktor hamburan balik, BSF merupakan perbandingan nilai bacaan TLD di permukaan fantom dengan nilai bacaan TLD di udara.

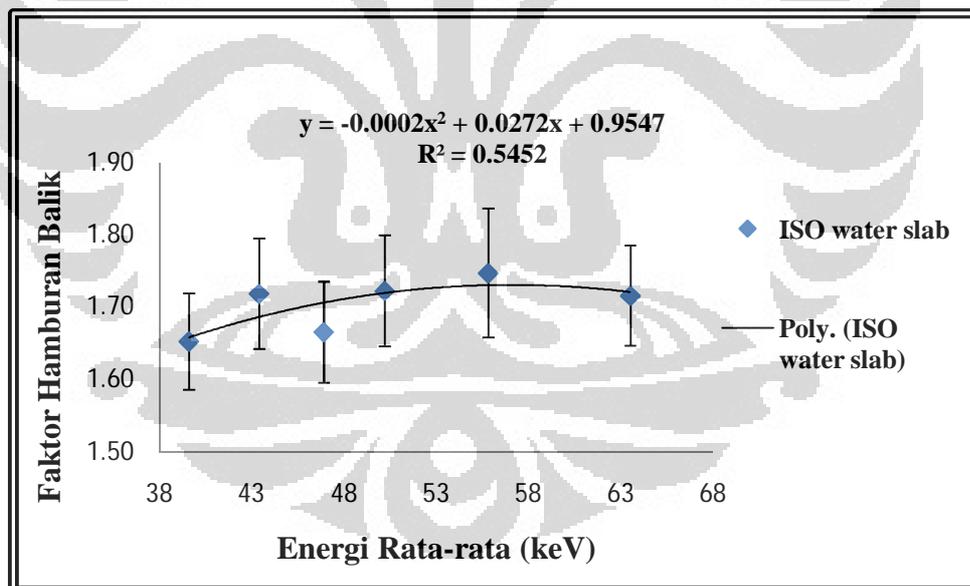
$$\text{Faktor hamburan balik (BSF)} = \frac{\text{Bacaan TLD di permukaan}}{\text{Bacaan TLD di udara}} \quad (4.2)$$

Tabel 4.2.2 Faktor Hamburan Balik Pada RQR 5 Sampai RQR 10

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung (kV)	Energi* Rata-rata (keV)	M _u (nC)	M _f (nC)	BSF
RQR 5	70	39,6	27,19±0,65	44,94±1,45	1,65±0,07
RQR 6	80	43,4	26,50±0,93	45,55±1,25	1,72±0,08
RQR 7	90	46,9	26,17±0,79	43,60±1,28	1,67±0,07
RQR 8	100	50,2	26,07±0,78	44,92±1,48	1,72±0,08
RQR 9	120	55,8	25,22±0,91	44,07±1,60	1,75±0,09
RQR 10	150	63,5	25,07±0,80	43,02±1,06	1,72±0,07

*[Sumber : Rahmat Andika, 2010]

Hubungan faktor hamburan balik terhadap energi rata-rata pada Tabel 4.2.2 ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Faktor Hamburan Balik Fantom *ISO Water Slab* Terhadap Energi Rata-rata

Gambar 4.5 menunjukkan faktor hamburan balik yang cenderung meningkat dengan bertambahnya energi rata-rata. Meskipun pada tegangan tabung 90 kV dan 150 kV mengalami penurunan. Hal ini karena waktu penyinaran TLD mengikuti perhitungan dengan K_i yang diperoleh dari Unfors Xi pada Tabel 4.2.1 yaitu K_i Unfors Xi pada tegangan tabung 90 kV dan 150 kV lebih rendah dari tegangan tabung yang lainnya. Sedangkan K_i pada tegangan tabung 90 kV lebih tinggi dari K_i pada tegangan tabung 150 kV sehingga BSF pada tegangan tabung 90 kV lebih rendah dari BSF pada tegangan tabung 150 kV. Namun, secara keseluruhan faktor hamburan balik yang diperoleh nilainya naik perlahan sesuai dengan kualitas radiasi RQR 5 sampai RQR 10. BSF dalam rentang RQR pada Tabel 4.2.2 dibandingkan dengan BSF dari TRS No.457 ditunjukkan pada Tabel 4.2.3.

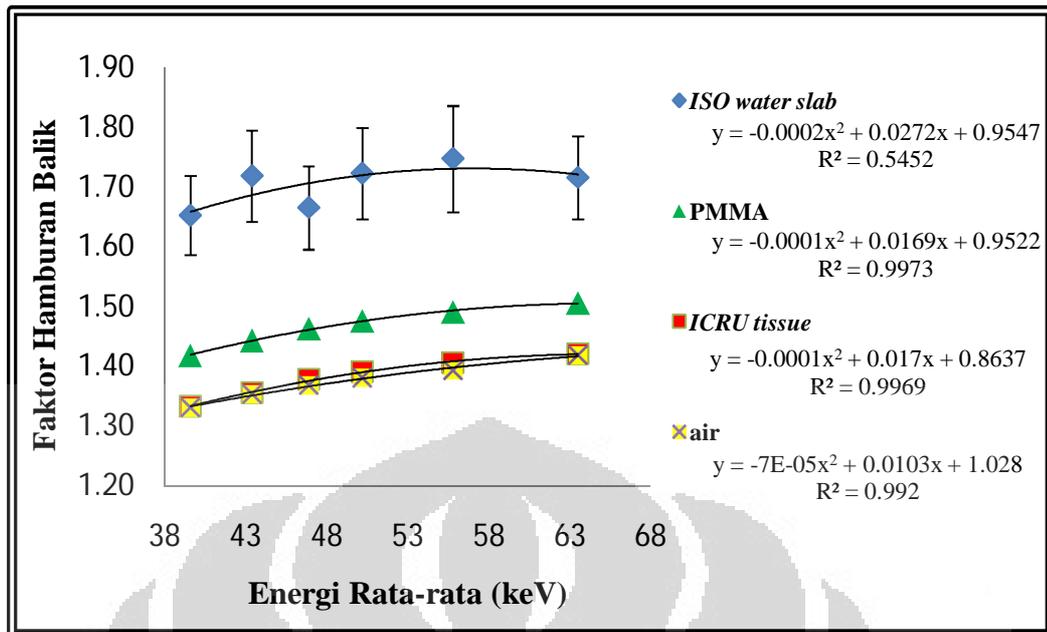
Tabel 4.2.3 Faktor Hamburan Balik Berbagai Kualitas Radiasi

Kualitas Radiasi	Tegangan tabung (kV)	Energi* rata-rata (keV)	Mu (nC)	Mf (nC)	BSF			
					Air ⁺	ICRU ⁺ tissue	PMMA ⁺	ISO water slab
RQR 5	70	39,6	27,19±0,65	44,94±1,45	1,33	1,33	1,42	1,65±0,07
RQR 6	80	43,4	26,50±0,93	45,55±1,25	1,35	1,36	1,44	1,72±0,08
RQR 7	90	46,9	26,17±0,79	43,60±1,28	1,37	1,38	1,46	1,67±0,07
RQR 8	100	50,2	26,07±0,78	44,92±1,48	1,38	1,39	1,48	1,72±0,08
RQR 9	120	55,8	25,22±0,91	44,07±1,60	1,39	1,41	1,49	1,75±0,09
RQR 10	150	63,5	25,07±0,80	43,02±1,06	1,42	1,42	1,51	1,72±0,07

*[Sumber : Rahmat Andika, 2010]

⁺ [Sumber : International Atomic Energy Agency, 2007]

Luas lapangan dalam penelitian digunakan ukuran 12,4 cm x 12,4 cm, maka faktor hamburan balik dari TRS No.457 juga dihitung untuk diverifikasi dengan luas lapangan yang digunakan dalam penelitian dan hasilnya seperti pada Tabel 4.2.3. Oleh karena itu, faktor hamburan balik hasil penelitian dapat dibandingkan dengan faktor hamburan balik dari TRS No.457. BSF dalam rentang RQR pada Tabel 4.2.2 dibandingkan dengan BSF dari TRS No.457 pada Tabel 4.2.3 ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Nilai BSF Untuk Berbagai Kualitas Radiasi (a) Air (TRS No.457), (b) *ICRU tissue* (TRS No.457), (c) PMMA (TRS No.457), (d) *ISO water slab* (penelitian ini).

Gambar 4.6 menunjukkan nilai BSF pada rentang RQR 5 sampai RQR 10 berbeda dengan nilai BSF dari TRS No.457 pada tegangan tabung 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV dan 150 kV, tetapi kecenderungannya sama yaitu meningkat perlahan-lahan dengan bertambahnya energi rata-rata. Perbedaan nilai BSF ini dikarenakan perbedaan material fantom dan filter yang digunakan pada penelitian dengan TRS No.457. Material fantom yang digunakan pada penelitian merupakan *ISO water slab phantom* 30x30x15 cm yang terdiri dari 2,5 mm PMMA di sisi depan permukaan fantom, 10 mm di sisi lainnya dan ditengahnya berisi air sedangkan fantom dari TRS No.457 adalah air, *ICRU tissue*, PMMA homogen dengan ukuran yang sama untuk ketiganya yaitu 30x30x15 cm.

BSF merupakan faktor koreksi yang penting dalam dosimetri radiasi dalam medium yang diakibatkan karena radiasi hambur. Radiasi hambur ini diakibatkan karena hamburan Compton dan semakin besar energi foton maka semakin besar kemungkinan terjadinya hamburan Compton sehingga radiasi hamburnya semakin besar yang ditunjukkan melalui faktor hamburan balik pada Tabel 4.2.3. Radiasi hambur yang dihasilkan berkaitan dengan *stopping power*

medium yang dikenai radiasi. Semakin besar kualitas radiasi yang mengenai medium maka *stopping power*-nya semakin kecil sehingga semakin besar kemungkinan terjadinya hamburan Compton dan terbentuknya radiasi hambur. Setelah diketahui koreksi faktor hamburan balik atau BSF sehingga dapat digunakan untuk estimasi dosis di permukaan fantom (ESD).

Tabel 4.2.4 Estimasi Dosis di Permukaan Fantom (ESD)

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung (kV)	Ki (mGy)	M _u (nC)	M _f (nC)	Nk _u (mGy/nC)	BSF _{Eks}	ESD _{Eks} (Nku x Mf)	ESD _{Eks} (Ki x BSF _{Eks})
RQR 5	70	10,00	27,19	44,94	0,61	1,65	16,53	16,53
RQR 6	80	9,92	26,50	45,55	0,58	1,72	17,05	17,05
RQR 7	90	10,00	26,17	43,60	0,60	1,67	16,66	16,66
RQR 8	100	10,10	26,07	44,92	0,58	1,72	17,40	17,40
RQR 9	120	10,05	25,22	44,07	0,57	1,75	17,56	17,56
RQR 10	150	9,93	25,07	43,02	0,58	1,72	17,04	17,04

Penentuan dosis di permukaan fantom (ESD) berdasarkan hasil eksperimen mengikuti perhitungan sebagai berikut :

$$ESD_{\text{eksperimen}} = (Nk_{\text{TLD}})_{\text{udara}} \cdot M_{\text{TLDpermukaan}}$$

$$ESD_{\text{eksperimen}} = (Nk_{\text{TLD}})_{\text{udara}} \cdot (BSF \times M_{\text{TLDudara}})$$

$$ESD_{\text{eksperimen}} = Ki \cdot BSF_{\text{eksperimen}} \quad (4.3)$$

Sedangkan rumus dosis di permukaan menurut referensi TRS No.457 adalah :

$$ESD_{\text{TRS}} = Ki \cdot BSF_{\text{TRS}}$$

$$ESD_{\text{TRS}} = (Nk_{\text{TLD}} \cdot M_{\text{TLD}})_{\text{udara}} \cdot BSF_{\text{TRS}} \quad (4.4)$$

Dengan ESD : *entrance surface dose* atau dosis dipermukaan.

Ki : *air kerma incident* atau dosis di udara.

Nk_{TLD} : koefisien kalibrasi TLD.

M_{TLD} : bacaan TLD.

BSF : *backscatter factor* atau faktor hamburan balik.

Pada Tabel 4.2.4, ESD eksperimen jika dihitung dengan rumus koefisien kalibrasi TLD di udara dikalikan dengan hasil bacaan TLD di permukaan fantom ($Nk_u \times M_f$) hasilnya sama dengan ESD eksperimen yang dihitung dengan rumus air kerma incident dikalikan dengan faktor hamburan balik yang diperoleh dari eksperimen ($K_i \times BSF_{Eks}$). Hal ini menunjukkan koefisien kalibrasi TLD di udara dapat digunakan untuk menghitung dosis di permukaan fantom yang berarti koefisien kalibrasi TLD dapat digunakan untuk kalibrasi TLD di permukaan fantom dengan fantom yang sama yaitu *ISO water slab phantom*.

Oleh karena koefisien kalibrasi TLD dapat digunakan untuk kalibrasi TLD di permukaan fantom, maka dapat diketahui faktor koreksi kualitas berkas ketika TLD dikalibrasi di permukaan fantom.

$$kQ = \frac{Nk_Q}{Nk_{Q0}} = \frac{\frac{K_i}{M_f}}{\frac{K_i}{M_{f0}}} = \frac{M_{f0}}{M_f} \quad (4.5)$$

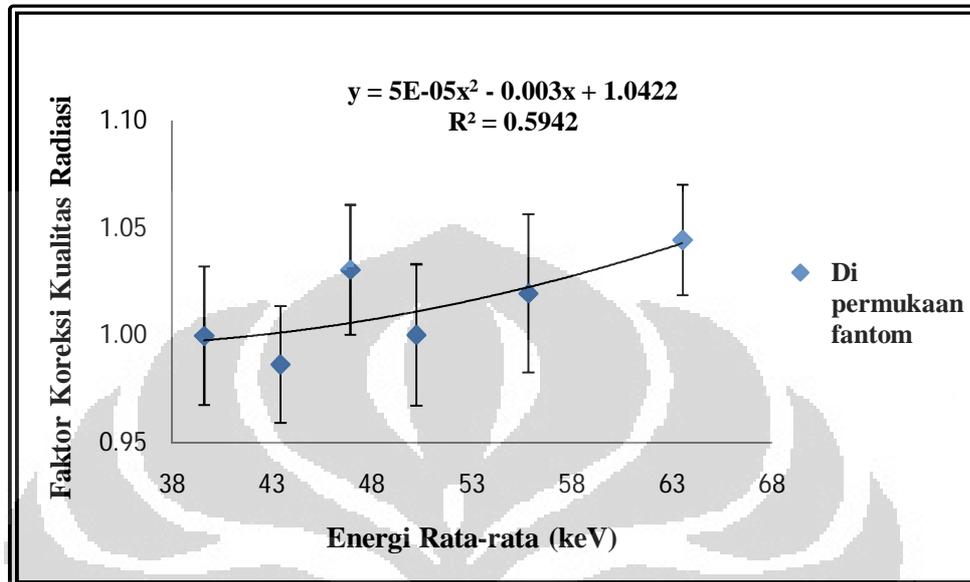
Dengan perhitungan faktor koreksi kualitas radiasi seperti rumus di atas, maka diperoleh faktor koreksi kualitas radiasi TLD di permukaan fantom dalam tabel berikut.

Tabel 4.2.5 Faktor Koreksi Kualitas Radiasi TLD di Permukaan Fantom

Kualitas Radiasi	Tegangan Tabung Sinar-x (kV)	Energi* Rata-rata (keV)	M_f (nC)	kQ_f
RQR 5	70	39,6	44,94±1,45	1,00±0,03
RQR 6	80	43,4	45,55±1,25	0,99±0,03
RQR 7	90	46,9	43,60±1,28	1,03±0,03
RQR 8	100	50,2	44,92±1,48	1,00±0,03
RQR 9	120	55,8	44,07±1,60	1,02±0,04
RQR 10	150	63,5	43,02±1,06	1,04±0,03

*[Sumber : Rahmat Andika, 2010]

Faktor koreksi kualitas radiasi TLD dipermukaan fantom, k_{Qf} pada Tabel 4.2.5 diperoleh dalam rentang antara $0,99 \pm 0,03$ sampai $1,04 \pm 0,03$. Hubungan faktor koreksi radiasi TLD pada Tabel 4.2.5 ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Faktor Koreksi Kualitas Radiasi TLD-100 di Permukaan Fantom

Faktor koreksi kualitas radiasi TLD-100 naik turunnya berkebalikan dengan naik turunnya bacaan TLD di permukaan fantom dari RQR 5 sampai RQR 10. Namun, secara keseluruhan faktor koreksi kualitas radiasi naik untuk kualitas radiasi RQR 5 sampai dengan RQR 10.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

- Koefisien kalibrasi TLD ditentukan untuk sinar-x kualitas radiasi dan diperoleh nilai koefisien kalibrasi $0,37 \pm 0,01$ mGy/nC; $0,37 \pm 0,01$ mGy/nC; $0,38 \pm 0,01$ mGy/nC; $0,39 \pm 0,01$ mGy/nC; $0,39 \pm 0,01$ mGy/nC; dan $0,40 \pm 0,01$ mGy/nC, untuk tegangan tabung 70 kV, 80 kV, 90 kV, 100 kV, 120 kV, dan 150 kV.
- Faktor hamburan balik untuk lapangan radiasi 12,4 cm x 12,4 cm sedikit meningkat dengan kualitas radiasi RQR 5 sampai dengan RQR 10 untuk HVL 2,58 mmAl sampai dengan 6,57 mmAl. .
- Koefisien kalibrasi TLD dapat digunakan untuk perhitungan dosis permukaan dalam kalibrasi TLD di permukaan fantom untuk *ISO water slab phantom*.
- Faktor koreksi kualitas radiasi TLD di permukaan dapat ditentukan dengan membandingkan bacaan TLD pada kualitas radiasi referensi terhadap bacaan TLD pada kualitas radiasi tertentu dalam rentang RQR.
- Dengan diketahuinya faktor hamburan balik, maka kalibrasi cukup dilakukan di udara.

5.2 Saran

- Faktor hamburan balik hasil eksperimen tidak sama dengan faktor hamburan balik dari *Technical Report Series No.457* maka sebaiknya jika kalibrasi dilakukan di fantom, nilai faktor hamburan balik dari fantom yang digunakan harus diketahui.
- Dengan diketahuinya faktor hamburan balik dari fantom yang digunakan, maka kalibrasi cukup hanya dilakukan di udara.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika, Rahmat.(2010). *Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas Terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X Pada Kualitas Radiasi RQR*. Depok : Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Bohm,J.*Calibration of Personal Dosimeter for Photon Radiation with Respect to The Personal Dose Equivalen Hp(10)*.Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.
- Boyd, Wesley L.(2009). *Using Thermoluminescent Dosimeters to Measure The Dose from High and Low Energy X-ray Sources*.United States : ProQuest LLC.
- Edwards, C.R.,et al.(2005).The Low Energy X-ray Response of The LiF:Mg:Cu:P Thermoluminescent Dosemeter: a Comparison with LiF:Mg:Ti. *The British Journal of Radiology*.78 (2005), 543–547.
- EJ Antonio, TM Poston, BA Rathbone.(2010).*Thermoluminescent Dosimeter Use for Environmental Surveillance at the Hanford Site,1971–2005*.Washington : Pacific Northwest National Laboratory Richland.
- Gabriel, JF.(1996). *Fisika Kedokteran*. Jakarta : Departemen Fisika Universitas Udayana.Denpasar-Bali.
- Ginjaume,M., et all.*Photon Personal Dosemeter Calibration Based on ISO 4037-3*. Barcelona-Spain : Institut de Tècniques Energètiques. Universitat Politècnica de Catalunya Diagonal 647 – 08028.
- Gualdrini,G., et all.*Contemporary Calibration of Photon Personal Dosemeters on Slab Phantom:Numerical and Experimental Evaluations*.ENEA: Dipartimento Ambiente Centro Ricerche "Ezio Ciementel".
- Hassan, M.A., et al.(2004).Standard Water Phantom Backscatter Factors for Medium Energy X-rays.*Romanian J. Biophys.*, Vol.14,Nos.1-4,P.69-79,Bucharest,2004.
- Hiswara,Eri.(1994).*Istilah dan Definisi Dalam Proteksi Radiasi*.Jakarta : BatanTenaga Atom Nasional,Pusat Standarisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi.

- International Atomic Energy Agency.(2000).*Safety Reports Series No.16 Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments*.Austria : International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency.(2007).*Technical Reports Series No.457 Dosimetry in Diagnostic Radiology : In International Code of Practice*.Austria : IAEA.
- Johns,Harold E. dan Cunningham,John R.(1983).*The Physics of Radology*. (4th ed.).Springfield, Illinois USA : Charles C Thomas Publisher.
- J. Trousil(National Personal Dosimetry Service, Prague, Czech Republic) and F. Spurn (Department of Radiation Dosimetry, Nuclear Physics Institute, Prague, Czech Republic).Passive Dosimeter Characteristics and New Developments.
- Nambi,K.S.V.(1977). *Thermoluminescence:Its Understanding and Applications*. Sao Paulo-Brazil : Instituto De Energia Atomica.
- Onoriode,AkpochaforMichael.(2010).*Thermoluminescent Dosimetry in Clinical kilovoltage Beams*.Johannesburg: Faculty of Science, University of the Witwatersrand,Johannesburg.
- Podgorsak, E.B. (2005). *Radiation Oncology Physics:A Handbook for Teachers and Student*. IAEA. Austria : IAEA.
- PTW.(2009/2010).*Ionizing Radiation Detectors*.PTW.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.(2008).*Dasar Fisika Radiasi, Spektroskopi & Pengukuran Radiasi*.Jakarta Selatan : Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.(2008).*Deteksi dan Pengukuran Radiasi*. Jakarta : Pusdiklat-BATAN.
- Rahmi,Ainur.(2010).*Analisis Ketergantungan Detektor Radiodiagnostik Terhadap Kualitas Radiasi RQR Menggunakan Protokol IAEA TRS No.457*.Depok : Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Sujadi,Dede.(2007).*Pengukuran Dosis Optimum Penyinaran Sinar-X Untuk Radiografi Terhadap Keselamatan Pasien*.Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI ISSN 0852-002 X,PPI-KIM.

LAMPIRAN I

Pengelompokkan TLD

- Waktu Penyinaran TLD di Udara Berdasarkan Ki Detektor PTW Pada Dosis di Udara 100 mGy

Tegangan Tabung (kV)	Background (nC)	Nk PTW (mGy/nC)	k _{p,T}	Laju Ki (nC/detik)	Waktu Penyinaran	Ki (mGy)
50	0	0,930	1,004	0,180	9 menit 56 detik	100,976
60	0	0,915	1,005	0,231	7 menit 53 detik	100,644
70	0	0,899	1,006	0,332	5 menit 34 detik	100,483
80	0	0,897	1,004	0,391	4 menit 45 detik	100,603
90	0	0,894	1,005	0,470	3 menit 58 detik	100,527
100	0	0,894	1,006	0,564	3 menit 18 detik	100,617
120	0	0,894	1,005	0,730	2 menit 33 detik	100,393
150	0	0,891	1,003	1,020	1 menit 50 detik	100,505

(lanjutan Lampiran I)

- Hasil Bacaan TLD Disinari di Udara Untuk Rentang Kualitas Radiasi RQR Pada Dosis di Udara 100 mGy

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung							
		50 kV Bacaan (nC)	60 kV Bacaan (nC)	70 kV Bacaan (nC)	80 kV Bacaan (nC)	90 kV Bacaan (nC)	100 kV Bacaan (nC)	120 kV Bacaan (nC)	150 kV Bacaan (nC)
TLD 1 Fk 0,6897	0,2	231,5	253,0	250,6	222,8	224,5	241,1	241,1	229,6
	0,2	214,4	251,8	267,4	221,0	244,7	230,0	205,4	227,9
	0,2	229,0	245,8	228,9	213,4	196,2	243,8	214,1	239,8
	0,2	217,3	250,8	232,9	212,7	218,2	242,3	234,1	201,9
	0,2	237,2	250,6	232,9	240,6	239,4	251,0	220,1	201,8
	0,2	233,8	249,6	260,2	253,3	244,5	211,8	244,4	182,1
	0,2	224,0	266,4	250,1	247,9	245,0	239,2	228,4	203,0
	0,2	206,3	220,5	259,1	204,9	237,8	218,2	193,5	217,2
	0,2	223,6	232,7	259,3	230,5	216,5	224,1	216,7	220,8
Rata-rata	0,2	224,1	246,8	249,1	227,4	229,6	233,5	222,0	213,8

(lanjutan Lampiran I)

		Tegangan Tabung							
		50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	120 kV	150 kV
TLD	Background (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)
TLD 2 Fk 0,6449	0,2	236,3	212,7	202,8	249,3	241,3	230,3	248,4	214,8
	0,2	226,4	236,1	238,7	221,3	233,5	246,7	243,0	217,0
	0,2	230,1	246,9	262,8	223,8	218,2	249,6	238,1	253,6
	0,2	230,3	227,9	237,2	229,0	247,5	256,2	203,8	230,8
	0,2	240,4	228,6	243,0	207,6	234,5	222,0	218,4	202,1
	0,2	247,3	204,9	220,3	215,1	241,0	215,7	207,9	174,4
	0,2	241,9	216,8	229,3	226,6	236,6	212,1	249,8	243,5
	0,2	236,3	213,4	232,3	219,4	218,3	234,9	175,0	197,2
	0,2	232,6	216,5	215,9	249,2	216,1	206,0	224,8	
Rata-rata	0,2	235,7	222,6	231,4	226,8	231,9	230,4	223,2	216,7

(lanjutan Lampiran I)

- Waktu Penyinaran TLD di Permukaan Fantom Berdasarkan Ki Detektor PTW Pada Dosis di Udara 100 mGy

Tegangan Tabung (kV)	Background Selama 60 detik (nC)	Nk PTW (mGy/nC)	$k_{p,T}$	Laju Ki (nC/detik)	Waktu Penyinaran	Ki (mGy)
50	0	0,930	1,001	0,180	9 menit 57 detik	99,789
60	0	0,915	1,001	0,233	7 menit 50 detik	99,186
70	0	0,899	1,003	0,335	5 menit 31 detik	100,598
80	0	0,897	1,003	0,391	4 menit 44 detik	99,836
90	0	0,894	1,003	0,470	3 menit 57 detik	99,681
100	0	0,894	1,002	0,570	3 menit 16 detik	100,486
120	0	0,894	1,001	0,735	2 menit 32 detik	99,949
150	0	0,891	1,000	1,029	1 menit 49 detik	100,148

(lanjutan Lampiran I)

- Hasil Bacaan TLD Disinari di Permukaan Fantom Untuk Rentang Kualitas Radiasi RQR Pada Dosis di Udara 100 mGy

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung							
		50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	120 kV	150 kV
		Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)	Bacaan (nC)
TLD 1 Fk 0,6897	0,2	254,7	258,9	277,0	263,0	235,1	291,2	251,5	249,2
	0,2	265,8	259,1	262,1	245,0	260,2	300,0	261,1	272,0
	0,1	256,4	229,0	256,1	243,1	274,1	263,8	256,5	262,2
	0,1	259,9	241,2	239,1	265,3	254,7	269,5	251,9	247,6
	0,2	246,6	256,9	251,1	259,6	300,0	262,8	236,2	265,6
	0,3	254,9	265,1	254,9	261,0	284,3	258,1	258,6	254,1
	0,2	239,1	238,2	259,8	259,1	245,6	251,4	249,5	254,0
	0,1	244,9	279,0	235,0	264,1	248,3	271,0	267,7	261,4
	0,2	250,7	256,0	255,5	261,8	253,4	262,2	240,0	242,7
	Rata-rata	0,2	252,5	253,7	254,5	258,0	261,7	270,0	252,6

(lanjutan Lampiran I)

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung							
		50 kV Bacaan (nC)	60 kV Bacaan (nC)	70 kV Bacaan (nC)	80 kV Bacaan (nC)	90 kV Bacaan (nC)	100 kV Bacaan (nC)	120 kV Bacaan (nC)	150 kV Bacaan (nC)
TLD 2 Fk 0,6449	0,2	256,4	276,2	271,0	267,0	267,5	260,9	264,0	275,1
	0,2	279,0	272,8	257,4	289,0	247,3	271,0	279,4	261,0
	0,1	264,2	260,8	242,5	281,5	290,3	214,8	276,4	253,2
	0,1	269,7	292,1	303,2	250,3	281,3	276,6	258,6	241,1
	0,2	233,0	273,9	244,5	258,6	256,4	244,8	255,1	253,3
	0,3	228,7	253,6	272,6	292,8	301,2	246,4	263,0	269,8
	0,2	236,7	270,6	263,7	293,5	272,4	288,4	247,4	251,7
	0,1	274,0	260,8	260,5	247,1	269,6	257,1	236,7	250,6
	0,2	237,0	289,0	244,6	269,0	258,3	289,3	276,2	215,0
Rata-rata	0,2	253,2	272,2	262,2	272,1	271,6	261,0	261,9	252,3

(lanjutan Lampiran I)

- Hasil Pengelompokkan TLD Pada Dosis di Udara 100 mGy

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung							
		50 kV Bacaan (nC)	60 kV Bacaan (nC)	70 kV Bacaan (nC)	80 kV Bacaan (nC)	90 kV Bacaan (nC)	100 kV Bacaan (nC)	120 kV Bacaan (nC)	150 kV Bacaan (nC)
TLD 1 Fk 0,6897	0,2	254,7	258,9	262,1	263,0	260,2	263,8	251,5	249,2
	0,2	256,4	259,1	256,1	245,0	274,1	269,5	261,1	272,0
		259,9	229,0	239,1	243,1	254,7	262,8	256,5	262,2
		246,6	241,2	251,1	265,3	284,3	258,1	251,9	247,6
		254,9	256,9	254,9	259,6	245,6	251,4	236,2	265,6
		239,1	265,1	259,8	261,0	248,3	271,0	258,6	254,1
		244,9	238,2	235,0	259,1	253,4	262,2	249,5	254,0
		250,7	256,0	255,5	264,1			267,7	261,4
					261,8			240,0	242,7

Lampiran II

Kalibrasi TLD untuk Kualitas Radiasi RQR 5 sampai RQR 10

- Waktu Penyinaran TLD di Udara Berdasarkan Ki Detektor Unfors Xi Pada Dosis di Udara 10 mGy

Tegangan Tabung (kV)	Filter (mmAl)	Arus (mA)	Waktu Penyinaran	Laju Ki (mGy/detik)	Ki (mGy)
70	5,41	2	1 menit 22 detik	0,120	10,00
80	6,11	2	1 menit 11 detik	0,140	9,92
90	6,79	2	1 menit	0,166	10,00
100	7,32	2	50 detik	0,202	10,10
120	8,8	1	1 menit 14 detik	0,136	10,05
150	10,83	1	55 detik	0,180	9,93

(lanjutan Lampiran II)

- Hasil Bacaan TLD di Udara Pada Dosis di Udara 10 mGy

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung					
		70 kV Bacaan (nC)	80 kV Bacaan (nC)	90 kV Bacaan (nC)	100 kV Bacaan (nC)	120 kV Bacaan (nC)	150 kV Bacaan (nC)
TLD 1 Fk 0,6897	0,06	26,91	25,91	26,72	26,06	24,69	24,86
	0,11	26,48	25,81	26,15	25,07	24,14	25,35
	0,15	27,32	25,52	26,43	26,02	25,66	25,35
	0,07	27,62	27,00	26,17	26,41	24,26	26,25
	0,08	26,73	26,71	28,07	26,82	25,55	25,06
	0,07	27,24	26,81	25,72	26,49	26,39	23,77
	0,09	26,90	27,99	27,81	25,20	24,26	24,96
		26,64	26,99	26,92	25,90	25,17	24,67
		27,90	25,88	24,92	26,78	23,98	25,95
		26,24	26,34	26,36	25,98	25,75	25,66
Rata-rata	0,09	27,00	26,50	26,53	26,07	24,98	25,19

(lanjutan Lampiran II)

- Waktu Penyinaran TLD di Permukaan Fantom Berdasarkan K_i Detektor Unfors Xi Pada Dosis di Udara 10 mGy

Tegangan Tabung (kV)	Filter (mmAl)	Arus (mA)	Waktu Penyinaran	Laju K_i (mGy/detik)	K_i (mGy)	Bacaan Monitor chamber (nC)
70	5,41	5	1 menit 17 detik	0,134	10,31	39,43
80	6,11	5	1 menit 3 detik	0,163	10,26	40,22
90	6,79	5	51 detik	0,194	9,91	38,49
100	7,32	5	45 detik	0,225	10,12	41,01
120	8,8	5	34 detik	0,299	10,18	42,34
150	10,83	5	24 detik	0,408	9,80	41,38

(lanjutan Lampiran II)

- Hasil Bacaan TLD di Permukaan Fantom Pada Dosis di Udara 10 mGy

TLD	Background (nC)	Tegangan Tabung					
		70 kV Bacaan (nC)	80 kV Bacaan (nC)	90 kV Bacaan (nC)	100 kV Bacaan (nC)	120 kV Bacaan (nC)	150 kV Bacaan (nC)
TLD 1 Fk 0,6897	0,14	45,98	46,09	39,89	43,88	42,45	40,88
	0,13	46,27	45,79	44,29	46,18	41,88	43,56
	0,14	45,49	44,10	40,68	43,88	42,88	42,67
	0,18	44,49	46,27	44,16	46,78	45,35	42,38
		46,29	46,78	41,89	44,07	46,78	43,98
		43,69	49,07	43,08	45,18	45,17	43,40
		45,49	46,98	42,19	43,88	44,48	42,67
		45,16	47,38	44,29	44,27	45,78	42,48
		42,99	45,49	39,00	46,18	46,17	42,08
Rata-rata	0,15	45,09	46,44	42,16	44,92	44,55	42,68