



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN AKURASI PROSES PEMBACAAN
DETEKTOR TL PADA TLD *READER* HARSAW MODEL 3500**

SKRIPSI

ARIONO VERDIANTO

0806325926

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN

ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN AKURASI PROSES PEMBACAAN DETEKTOR TL
PADA TLD *READER* HARSAW MODEL 3500**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

ARIONO VERDIANTO

0806325926

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

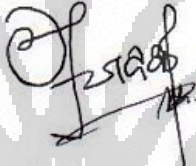
JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ariono Verdianto

NPM : 0806325926

Tanda Tangan : 

Tanggal : 13 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Ariono Verdianto
NPM : 0806325926
Program Studi : S-1 Reguler Fisika
Judul : Peningkatan Akurasi Proses Pembacaan Detektor TL pada
TLD *Reader* Harsaw Model 3500

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

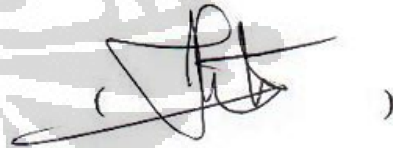
Pembimbing I : Dwi Seno K Sihono, M. Si



Pembimbing II: Heru Prasetyo, M. Si



Penguji I : Dr. Supriyanto A. Pawiro



Penguji II : Kristina Tri Wigati, M. Si



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 13 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Terucap Syukur, Alhamdulillah, kepada Allah SWT yang telah memberikan karunia dan hidayah-Nya kepada penulis. Shalawat beriring salam sudah selayak menjadi hadiah buat junjungan Nabi besar Muhammad Saw. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Penulis juga sangat terbantu dengan kehadiran berbagai pihak, tidak hanya terbatas bantuan, tapi dukungan, dorongan semangat serta iringan do'a. Untuk itu izinkan penulis untuk mengucapkan rasa terima kasih pada kesempatan kali ini, antara lain kepada :

1. Untuk kedua Orang tua penulis, Ibunda Zuryati dan Ayahanda M Muslim, untaian doa yang tak kunjung habis terucap ikhlas dari hati kalian mengiringi setiap ayunan langkah kaki penulis.
2. Bapak Dwi Seno K Sihono, M. Si, selaku pembimbing I, terima kasih Pak memberi kesempatan kepada penulis untuk diskusi dan memberikan koreksi yang membangun.
3. Bapak Heru Prasetyo, M. Si, selaku pembimbing II, terima kasih Pak dengan sabar membimbing penulis dalam penelitian, pemikirannya dalam setiap diskusi melalui berbagai media sehingga dengan mudah melakukan diskusi, dan memberikan saran-saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
4. Bapak Dr Supriyanto A. Pawiro selaku penguji I dan Kristina Tri Wigati, M. Si selaku penguji II.
5. Ibu Diah, Ibu Helfi, Ibu Yati, Mba Dewi, Mas Eka, Mba Nunung, Mas Kri, Bapak Nurman dan Mas Assef terima kasih atas bantuannya yang diberikan kepada penulis untuk melakukan penelitiannya.
6. Seluruh keluarga besar penulis, kakak : Syaliarni, Salvita, Salmiah, Masrizal, Salmiati, Ahmad Yulis, Andriyanto, Mardeli Angraini, Aria Pendiato, dan Novit Irwanto; kakak ipar: Syahril, Sunarto, dan Kartini; adik: Anif Fitri dan Ami Fandra; Uncu, Mintuo serta keponakan penulis. Terima kasih atas semua semangat dan doa yang kalian berikan.

7. Melda yang telah memberi semangat kepada penulis, *thank, you have make me feel better and always gives me spirits.*
8. Buat teman-teman medis '08 Ole, Lukman, Gun-gun, Markus, Rara, Zeze, Jannah, Putri, Susi, dan Ita, sama-sama bertualang selama KP.
9. Kawan-kawan seperjuangan skripsi dibawah bimbingan Pak Heru: Bowo, Ari, Aisyah, Mba Pipit, Mba Aden dan Pak Suharsono, akhirnya perjuangan ini dapat menghasilkan sebuah karya yang mudah-mudahan akan membawa manfaat.
10. Kawan-kawan di UKM Merpati Putih UI, Ratih, Aji, Wibi, Hakim, Bu Nenden, Pa Nazli, Pelatih: Mas Iwan dan Mas Deden, Budiyono, Jupe, Dini, Oki, Oim, Lita maupun yang belum tersebut namanya. Salam juang.
11. Teman-teman seperjuangan *family of Physics* 2008, mungkin penulis tidak bisa menyebutkannya satu per satu, tapi yang jelas berada ditengah-tengah kalian penulis sangat beruntung. Kalian penuh semangat, peduli sesama, tetap hangat dan solid *family of physics*, keluarga kedua bagi penulis.
12. Seluruh dosen Fisika dan Fisika Medis yang telah memberikan ilmunya yang sangat bermanfaat dan berharap penulis dapat meneruskannya.
13. Mba Ratna, Pak Madi dan seluruh staff informasi dan perpustakaan Departemen Fisika yang telah menolong penulis dalam mendapatkan informasi.
14. Terima kasih kepada Dinas Pendidikan SUMBAR bantuan dana hidup yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat melanjutkan studi. Bagian kemahasiswaan dan informasi beasiswa UI yang membantu penulis untuk menjadi salah satu kandidat penerima beasiswa dari Bank Indonesia.

Akhirnya penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Agar penulisan skripsi ini lebih baik lagi untuk kedepan maka sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap dengan adanya skripsi ini dapat membantu semua pihak yang sangat membutuhkan pengetahuan yang berkaitan dengan topik skripsi ini.

Mei 2012

Penulis

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

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

Nama : Ariono Verdianto

NPM : 0806325926

Program Studi : S-1 Reguler 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 Noneklusif (Non-exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Peningkatan Akurasi Proses Pembacaan Detektor TL pada TLD Reader
Harsaw Model 3500**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Juni 2012

Yang menyatakan



(Ariono Verdianto)

ABSTRAK

Nama : Ariono Verdianto
Program studi : S-1 Reguler Fisika
Judul skripsi : Peningkatan Akurasi Proses Pembacaan Detektor TL pada TLD
Reader Harsaw Model 3500

Dosimeter luminisensi LiF:Mg,Ti (TLD-100) merupakan detektor yang memiliki densitas material hampir ekuivalen dengan jaringan tubuh manusia dan merupakan pilihan detektor yang terbaik untuk pengukuran dosis radiasi *in vivo*. Selain itu, TLD-100 memiliki kelemahan seperti ketidakseragaman respon, efek *fading*, dan ketergantungan respon energi. Keberadaan *fading* dan variasi sensitivitas sangat mempengaruhi respon TLD. Detektor TL memiliki respon yang bersifat tidak linier dari rentang dosis rendah sampai dosis tinggi. Keakurasian dalam estimasi dosis sangat penting dalam melakukan audit dosimetri. Dalam penelitian ini dilakukan usaha peningkatan akurasi proses bacaan TLD melalui pengurangan variasi respon TLD dengan memperkecil rentang rata-rata respon pada nilai $\pm 3\%$, penentuan faktor koreksi *fading* berdasarkan variasi respon TLD 0.05%, mencari respon TLD terhadap perubahan energi pada rentang RQR dan Cobalt 60. Selain itu dilakukan juga evaluasi penggunaan metode bacaan menggunakan kondisi TTP dosis rendah dan TTP dosis tinggi. Berdasarkan pengelompokan TLD dengan variasi respon 0.05%, diperoleh koreksi *fading* $y = 122.962 x^{-0.049}$, fungsi ini dapat digunakan untuk mengkoreksi bacaan TLD jika pembacaan dilakukan pada hari yang berbeda. Dengan menggunakan variasi respon TLD 3% diperoleh respon TLD yang menurun pada RQR4-RQR7, dan menaik pada RQR8-RQR15. Diketahui pengaruh pengaturan TTP memberikan perbedaan rasio bacaan dosis rendah terhadap dosis tinggi pada TLD yang berdampak nilai faktor kalibrasi TLD berubah sebesar 1.05, 1.03, dan 1.05 berturut dengan tegangan tabung 40, 70 dan 150 kV, sedangkan untuk cobalt 60 dengan variasi dosis 2, 1, dan 0.1 Gy perbandingannya sebesar 0.95, 0.96, dan 1.00. Estimasi ketidakpastian gabungan tipe A dan tipe B diperoleh rata-rata adalah sebesar 5.77% dengan batas tingkat kepercayaan 95%, dua standar deviasi.

Kata kunci : TLD-100, *Fading*, *annealing*, ketidakpastian, faktor kalibrasi.

ABSTRACT

Name : Ariono Verdianto
Study Program : Bachelor Degree of Physics
Title : The Accuracy Enhancement of TL Detector Reading Process on TLD Reader Harsaw Model 3500

Luminiscent dosimeters LiF: Mg, Ti (TLD-100) is detector that has an equivalent density material compare to human tissue and the best choice for in-vivo radiation dose measurement. On the other hand, TLD-100 has some weaknesses such as the ununiform responses, fading effects, and energy response dependent. The presence of fading and variations of sensitivity are greatly affect to the response of TLD. The response of detector TL is not linear from low dose up to high dose. Accuracy in dose estimation is essential in performing dosimetry audit. This study aim to increase the accuracy of TLD reading process by reducing the variation response of TLD with minimizing the response range within $\pm 3\%$, measuring of the fading correction factor using TLD with response variation $\pm 0.05\%$, determining TLD response dependency in energy RQR range and Cobalt 60. In addition, this work also evaluate the reading method using low and high dose TTP setting. Based on $\pm 0.05\%$ TLD response variation grouping, fading correction function is $y = 122.962 x^{-0.049}$, this function can be used to correct the TLD readings when readings performed on different day. By using a variation of TLD response $\pm 3\%$, it is found there is a decreased response in TLD, over RQR4-RQR7, and an increased over RQR8-RQR15. It is found that different setting of TTP will affects readings result low dose ratio with the high dose will change on TLD of calibration factor value 1.05, 1.03, and 1.05 respectively with a tube voltage of 40, 70 and 150 kV, while for cobalt 60 with variation of doses around 2, 1, and 0.1 Gy the value of ratio around 1.05, 1.04, and 1.00. Estimation uncertainty both of type A and type B are obtained on the average of 5.77% with a limit of level confidence 95%, two standard deviations.

Key words : TLD-100, Fading, annealing, the uncertainty, the calibration factor.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSYARATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Maksud dan Tujuan	2
1.4 Metode Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sistem Dosimetrik Termoluminisensi	5
2.2 Deskripsi TLD (<i>Thermoluminescence Dosemeter</i>).....	5
2.3 Dosimetri Termoluminisensi	6
2.4 Karakteristik Material TL	8
2.5 Sifat TL dari LiF	10
2.6 <i>Batch</i>	13
2.7 Stabilitas Sinyal Setelah Penyinaran	14
2.8 TLD <i>Reader</i>	15
2.9 Pemanasan (<i>Annealing</i>)	17
2.10 Ketidakpastian Pengukuran	19
BAB III. METODE PENELITIAN	
3.1 Prosedur Pemanasan	20
3.2 Penyinaran TLD	21

3.3	Prosedur Pengelompokkan TLD	23
3.4	Pemilihan <i>Time Temperature Profile</i> (TTP)	25
3.5	Penentuan Faktor Koreksi <i>Fading</i>	27

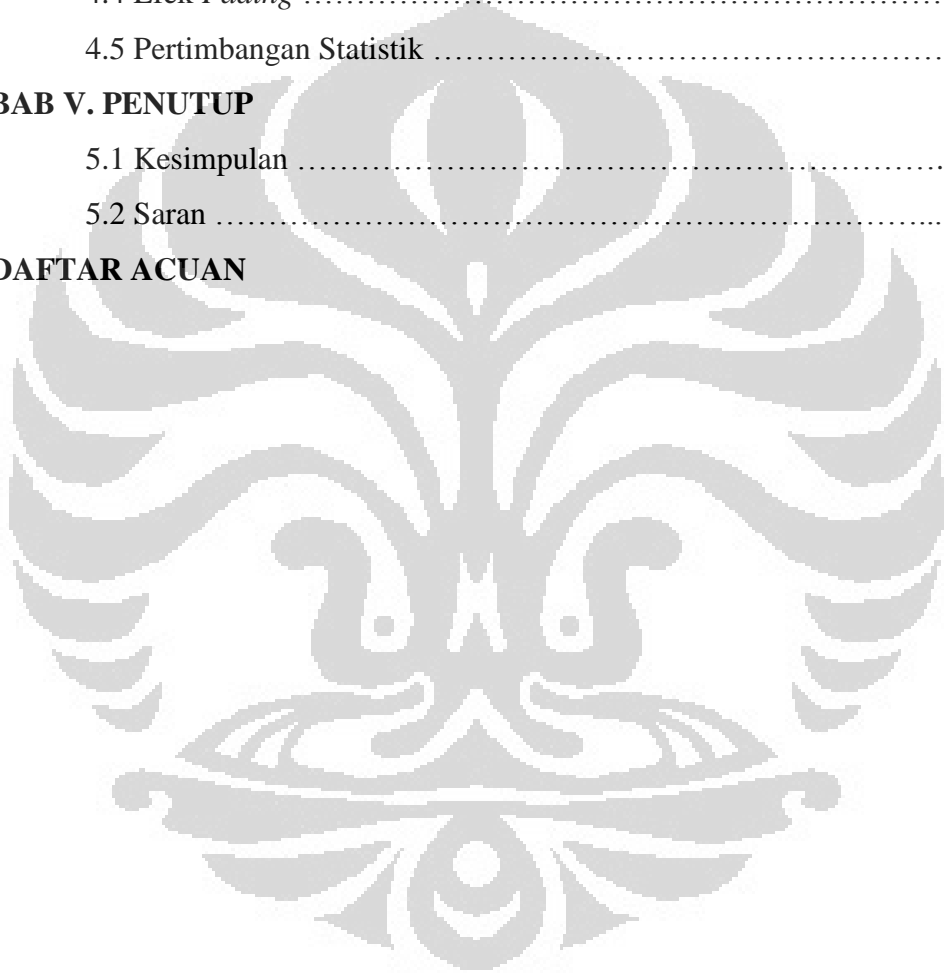
BAB IV. HASIL DAN DISKUSI

4.1	Pengelompokkan TLD	28
4.2	Koreksi Respon TLD Terhadap Perubahan Energi	31
4.3	Pengaruh Pemilihan Pengaturan TTP.....	37
4.4	Efek <i>Fading</i>	41
4.5	Pertimbangan Statistik	43

BAB V. PENUTUP

5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	48

DAFTAR ACUAN

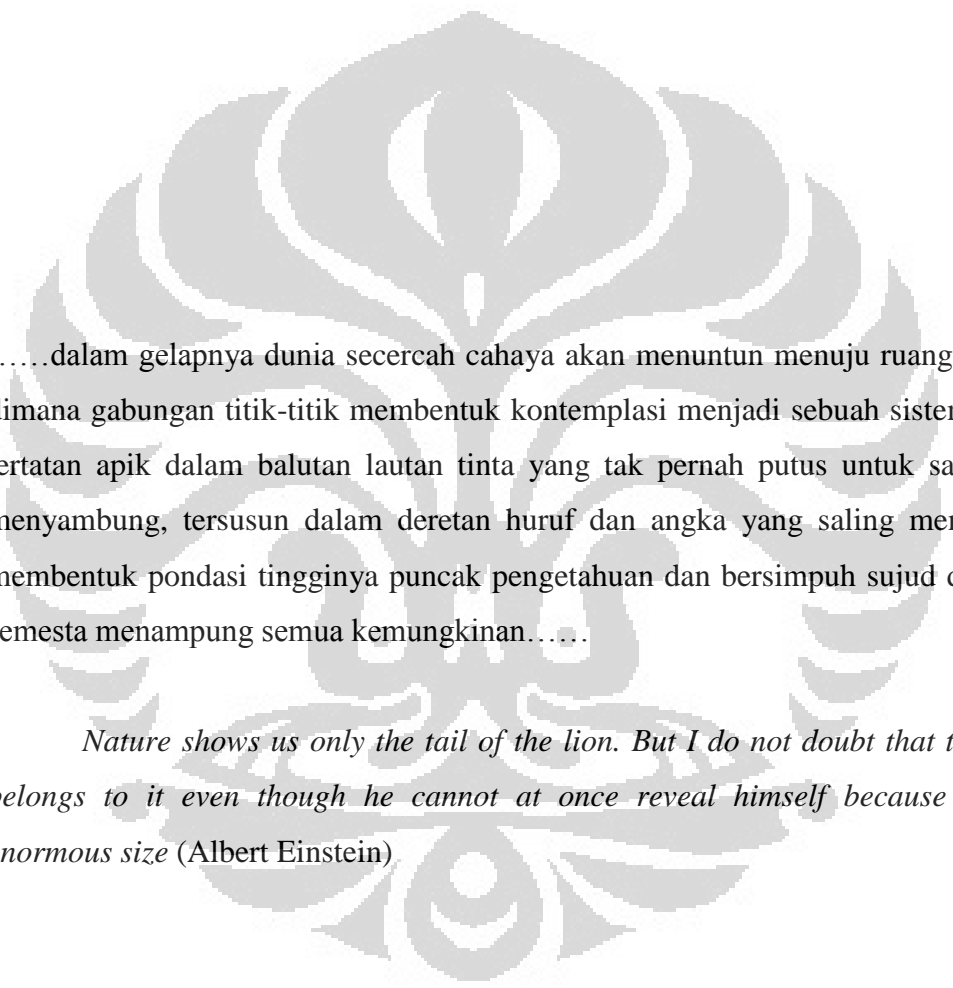


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Salah satu kemungkinan mekanisme untuk termoluminisensi.....	7
Gambar 2. Kurva pancar TLD-100 (A) – setelah prosedur pre-heating (B) waktu paruh dari masing-masing juga dapat dilihat.....	11
Gambar 3. Model siklus pembacaan	12
Gambar 4. Sinyal TL terhadap dosis serap	13
Gambar 5. Diagram skematik dari sebuah pembaca TLD klasik	16
Gambar 6. Ilustrasi penyinaran TLD-100 menggunakan pesawat Co-60.....	23
Gambar 7. Profile waktu terhadap suhu.....	26
Gambar 8. Kurva pancar dengan puncak yang tidak stabil pada temperatur rendah	26
Gambar 9. Ilustrasi kalibrasi TLD di udara	28
Gambar 10. Respon TLD-100 untuk kelompok pertama.....	29
Gambar 11. Respon TLD-100 untuk kelompok kedua.....	30
Gambar 12. Grafik faktor kalibrasi terhadap tegangan tabung sinar x	32
Gambar 13. Grafik faktor kalibrasi relatif terhadap referensi di RQR7	32
Gambar 14. Energy foton (sinar x) terhadap sensitivitas yang dinormalisasi (sumber: P.R Gonzáles <i>et. al</i> , 2006).....	33
Gambar 15. Grafik respon TLD-100 terhadap Co-60 dengan dosis 2 Gy (a), 1 Gy (b) dan 0.1 Gy (c)	35
Gambar 16. Kurva pancar TLD-100 dengan pemberian dosis 1 Gy menggunakan Co-60 (atas) dibaca dengan pengaturan TTP untuk dosis tinggi dan (bawah) pengaturan TTP untuk dosis rendah.....	39
Gambar 17. Kurva Fading hasil ekstrapolasi dari 8 hari bacaan TLD.....	42

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik dosimetrik material TL yang berbeda (sumber: <i>handbook thermoluminescence of solids</i> , McKeever).....	9
Tabel 2. <i>Fading</i> termal dari material TL yang berbeda setelah <i>preheating</i> (sumber: J. Van Dam dan G. Marinello, 2006)	15
Tabel 3. Prosedur annealing untuk beberapa material TLD yang sering digunakan dalam aplikasi medis, personal monitoring, industri dan survei lingkungan	18
Tabel 4. Rekomendasi TTP standar (sumber : manual book TLD reader 3500) ...	27
Tabel 5. Respon dosimeter TL dan faktor kalibrasi dengan besar dosis 10 mGy pada beberapa tegangan tabung sinar x yang berbeda.....	31
Tabel 6. Perbandingan respon bacaan TLD dengan besar dosis yang berbeda	36
Tabel 7. Perbandingan respon bacaan TLD-100 dengan besar dosis 1 Gy menggunakan pengaturan TTP untuk dosis tinggi	36
Tabel 8. Respon TLD-100 ketika diradiasi dengan pesawat Co-60 menggunakan SSD 80 cm dengan beberapa variasi dosis	37
Tabel 9. Respon TLD-100 dosis radiasi 1Gy dengan pengaturan TTP yang berbeda	38
Tabel 10. Respon TLD-100 menggunakan Co-60 dengan beberapa variasi dosis	40
Tabel 11. Respon dosimeter TL saat dibaca pada hari yang berbeda setelah penyinaran menggunakan sumber sinar x	42
Tabel 12. Ketidakpastian tipe A dan Tipe B untuk semua tegangan tabung yang digunakan	43
Tabel 13. Ketidakpastian gabungan untuk setiap tegangan tabung sinar x	43



.....dalam gelapnya dunia secercah cahaya akan menuntun menuju ruang-ruang, dimana gabungan titik-titik membentuk kontemplasi menjadi sebuah sistem yang tertatan apik dalam balutan lautan tinta yang tak pernah putus untuk sambung menyambung, tersusun dalam deretan huruf dan angka yang saling menyilang membentuk pondasi tingginya puncak pengetahuan dan bersimpuh sujud di alam semesta menampung semua kemungkinan.....

Nature shows us only the tail of the lion. But I do not doubt that the lion belongs to it even though he cannot at once reveal himself because of his enormous size (Albert Einstein)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Awal tahun 1969, IAEA, berkolaborasi dengan WHO, merupakan organisasi pertama yang memprakarsai audit dosimetri pada kalibrasi berkas radioterapi yang berskala internasional, menggunakan *Thermoluminescence Dosemeter* (TLD). Selama 32 tahun, layanan audit IAEA/WHO telah memverifikasi kalibrasi lebih dari 4200 berkas radioterapi.

Tindakan penggunaan material *Thermoluminescence*, TL, yang tidak tepat dalam pada aplikasi medis akan memunculkan hipotesa yang tidak dapat diterima dan ketidakpastian yang relatif lebih besar dalam estimasi dosis. Dengan Penggunaan dan kalibrasi sistem TLD yang tepat, memungkinkan untuk memperoleh ketidakpastian pengukuran dalam batas yang dapat diterima (Kirby *et al*, 1992).

Dosimetri termoluminisensi didasarkan pada kemampuan kristal untuk menyerap dan menyimpan energi dari radiasi ionisasi, yang ketika dipanaskan akan mengemisikan kembali dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Cahaya yang diemisikan kemudian dideteksi dengan sebuah *photomultiplier tube* (PMT) dan berhubungan dengan dosis serap yang diterima oleh material TL (Mc Kinlay, 1981; Mc Keever, 1985).

Dosimeter luminisensi LiF:Mg, Ti (TLD-100) merupakan detektor yang memiliki material hampir ekuivalen dengan jaringan tubuh manusia dan merupakan pilihan detektor yang terbaik untuk pengukuran dosis radiasi *in vivo*. Detektor ini termasuk ke dalam golongan alkali halida yang didoping dengan magnesium dan titanium yang berfungsi sebagai aktivator. TLD-100 memiliki kelemahan seperti ketidakseragaman respon, efek *fading*, dan variasi sensitivitas yang mempengaruhi hasil bacaan responnya pada dilakukan pembacaan.

Pengisian level-level *traps* dalam material TL bergantung pada besar energi yang diterimanya. Detektor ini memiliki karakteristik respon yang linier dari 5×10^{-5} sampai 1 Gy dan dosis yang lebih besar dari 1 Gy, TLD-100 memiliki respon supra linier.

Dengan kata lain, detektor TLD memiliki respon yang bersifat tidak linier dari rentang dosis rendah sampai dosis tinggi.

Sebuah pertimbangan penting dalam memilih sebuah dosimeter TL adalah stabilitas sinyal. Terutama sekali untuk menilai apakah muatan yang terperangkap selama radiasi akan hilang sebelum dibaca oleh paparan panas yang tidak diinginkan (*thermal fading*), cahaya (*optical fading*) dan faktor yang lainnya (*anomalous fading*). Ini ditunjukkan dengan sebuah penurunan respon TLD yang bergantung pada waktu tunda antara radiasi dan pembacaan.

Dosimeter TL memiliki keuntungan untuk menyimpan informasi dalam waktu yang relatif lebih lama. Sehingga memungkinkan untuk melakukan audit pasca *treatment* yang dilakukan dari rumah sakit atau pusat-pusat dosimetri. Untuk itu keakurasian dalam estimasi dosis sangat penting. Keakurasian pengukuran dipengaruhi oleh 2 ketidakpastian, tipe A dan tipe B, yang dalam perhitungannya kedua ketidakpastian ini digabungkan. Ketidakpastian tipe A dipengaruhi oleh alat-alat pengukuran atau disebut juga dengan ketidakpastian sistematis yang dapat dilakukan pengontrolan, sedangkan tipe B berhubungan dengan proses pengukuran atau disebut juga dengan ketidakpastian acak dan tidak dapat dilakukan pengontrolan.

1.2 Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dilakukan penelitian ini adalah melakukan usaha peningkatan akurasi proses bacaan TLD melalui pengurangan variasi respon TLD dengan memperkecil rentang rata-rata respon pada nilai $\pm 3\%$, penentuan faktor koreksi *fading* berdasarkan variasi respon TLD 0.05%, mencari respon TLD terhadap perubahan energi pada rentang RQR dan Cobalt 60. Selain itu dilakukan juga evaluasi penggunaan metode bacaan menggunakan kondisi TTP dosis rendah dan TTP dosis tinggi.

1.3 Pembatasan Masalah

Adapun penelitian ini dibatasi pada pembuatan metode pembacaan agar didapatkan faktor kalibrasi dosimeter TL dengan ketidakpastian yang rendah sebagai upaya peningkatan akurasi proses pembacaan detektor TL. Mencari faktor

koreksi fading dosimeter TL setelah dilakukan penyinaran dengan sumber yang terkalibrasi. Dalam hal ini juga dilakukan pengamatan pengaruh pengaturan TTP pada saat dilakukan pembacaan detektor.

1.4 Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang bersumber pada jurnal-jurnal ilmiah dan buku. Kemudian dilanjutkan dengan pengukuran dalam laboratorium, sebelum digunakan TLD-100 dipanaskan dengan prosedur pemanasan yang sesuai. Penyinaran TLD-100 untuk tujuan pengelompokan dilakukan di SSDL (*Secondary Standar Dosemetry Laboratorium*) menggunakan x-ray dengan teknik RQR. Sebagai perbandingan respon TLD terhadap energi sumber dilakukan juga penyinaran menggunakan cobalt 60. Pengukuran respon dosimeter menggunakan *reader* Thermo Scientific Harsaw model 3500. Dengan bantuan aplikasi software *The Windows Radiation Evaluations and Management System* (WinREMS) yang secara langsung beroperasi dengan *reader* TLD Thermo Scientific Harsaw yang dapat menghasilkan *glow curve* (kurva pancar) radiasi dari dosimeter yang digunakan. *Fading* diamati dengan cara memilih variasi respon TLD yang lebih sempit (0.05%), kemudian dibaca setelah 1-8 hari setelah penyinaran dengan cara membiarkan *fading* secara alami. Untuk melihat pengaruh pengaturan TTP maka dilakukan variasi kondisi pada saat pembacaan TLD.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri dari 5 bab. Masing-masing bab memiliki sub-bab untuk mempermudah penulisan dan penjelasan. Penulisan bab-bab tersebut adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab pendahuluan berisi tentang latar belakang dilakukannya penelitian ini, permasalahan yang diteliti, pembatasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan laporan penelitian ini.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini penulis menguraikan prinsip-prinsip dosimetri, penelitian-penelitian yang telah ada, dan mengenai software WinREMS.

BAB III. METODE PENELITIAN

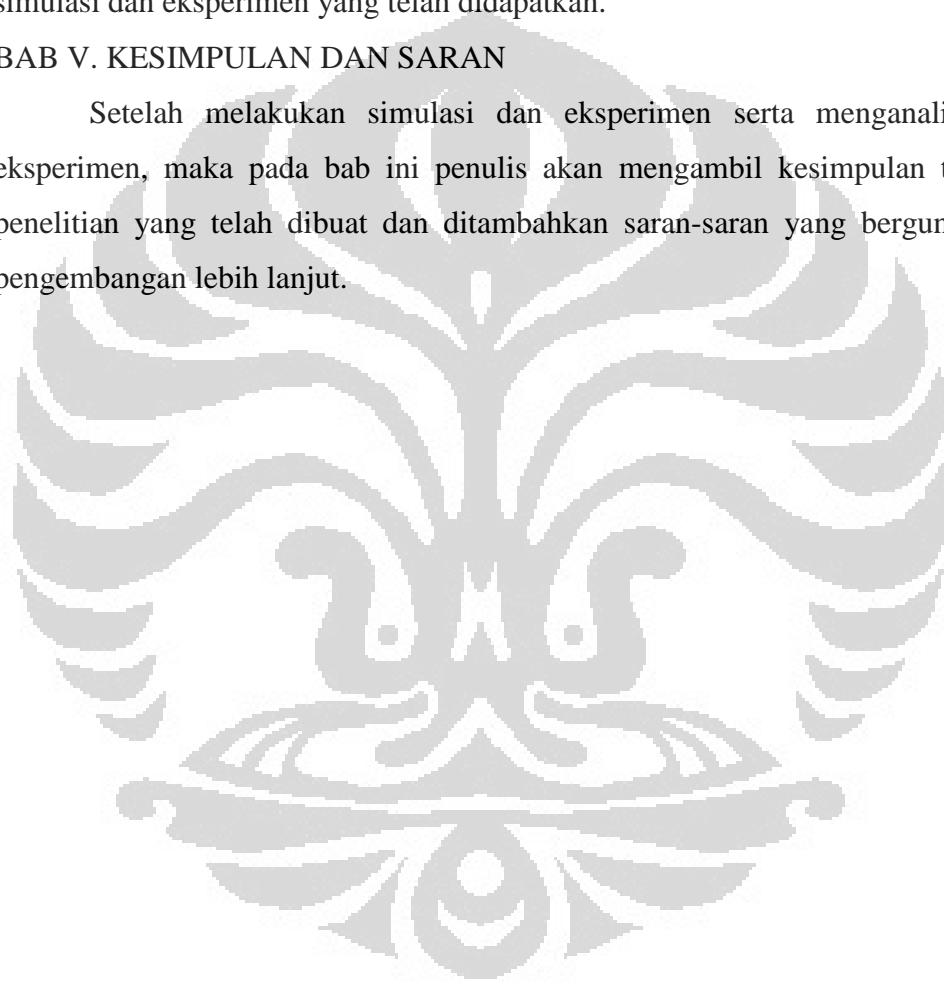
Bab metode penelitian ini berisi mengenai tahap-tahap simulasi dengan menggunakan software WinREMS dan tahap-tahap yang dilakukan dalam eksperimen pengukuran dosimeter TLD-100.

BAB IV. HASIL DAN DISKUSI

Simulasi dan eksperimen yang dilakukan akan memberikan hasil, hasil tersebut ditampilkan pada bab ini. Bab ini juga akan menjelaskan tentang hasil simulasi dan eksperimen yang telah didapatkan.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan simulasi dan eksperimen serta menganalisa data eksperimen, maka pada bab ini penulis akan mengambil kesimpulan terhadap penelitian yang telah dibuat dan ditambahkan saran-saran yang berguna untuk pengembangan lebih lanjut.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Dosimetrik Termoluminisensi

Sebuah sistem dosimetrik termoluminisensi terdiri dari beberapa bagian seperti berikut ini :

- Elemen pasif : dosimeter termoluminisensi (TL) merupakan detektor
- *Reader* TL secara skematik terdiri dari elemen pemanas, PM tube, satu atau lebih jaringan elektronik.
- Algoritma yang tepat untuk mengubah sinyal TL (respon dari *reader*) menjadi dosis.
- Oven dan/atau tungku pembakar yang akan digunakan untuk perlakuan termal dosimeter TL (prosedur pemanasan/*annealing*)
- Elemen-elemen pelengkap lainnya atau fasilitas lainnya yang dapat digunakan untuk pengaturan yang benar dan bekerja untuk sistem dan/atau untuk implementasi sistem (contohnya kalibrasi sumber; program yang mampu menguraikan kurva pancar, untuk membuat estimasi otomatis dari sinyal latar belakang; untuk mengkalkulasi nilai rata-rata TL dan lain sebagainya)

2.2 Deskripsi TLD (*Thermoluminescence Dosemeter*)

Dosimeter termoluminisensi adalah sebuah material yang berbentuk kristal dapat menyimpan energi serap dari paparan dengan sebuah sumber radioaktif dan melepaskannya kembali dalam bentuk cahaya tampak ketika dipapar dengan panas sampai temperatur tertentu. TLD telah digunakan secara luas untuk studi yang berbeda-beda (*in vivo*, *in-phantom* dan survei lingkungan). TLD memiliki keuntungan yaitu kestabilan dalam penyimpanan sinyal dalam yang relatif lebih lama dan biaya akuisisi yang rendah jika dibandingkan dengan detektor yang lainnya seperti dioda. TLD digunakan untuk dosimetri *in-vivo* terutama karena ukuran fisiknya yang kecil. Material TL tersedia dalam berbagai bentuk fisik seperti *chip*, pita, *disk*, batangan dan serbuk.

2.3 Dosimetri Termoluminisensi

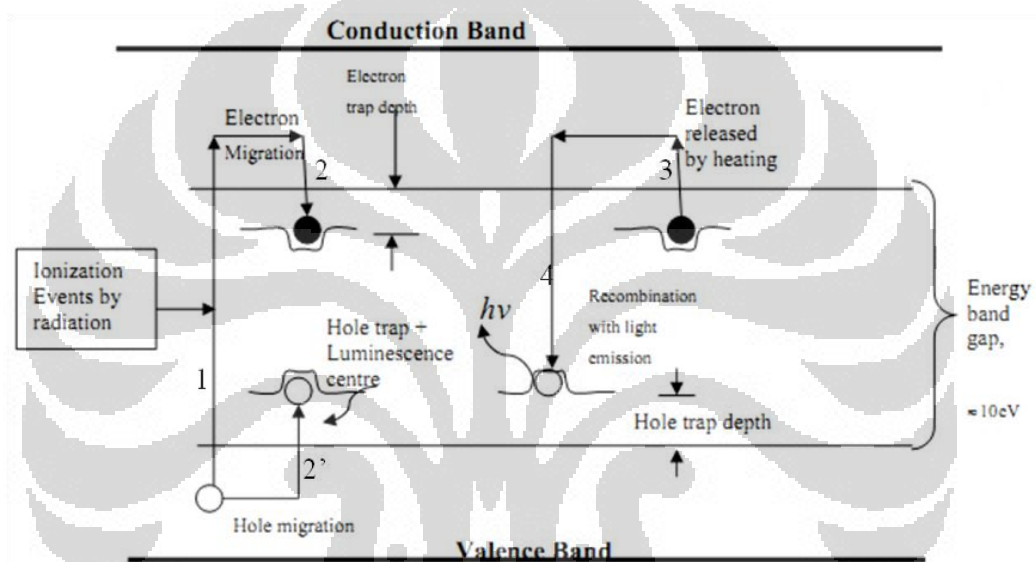
TLD (*Thermoluminescence Dosemeter*) melepaskan sejumlah cahaya yang sebanding dengan paparan radiasi dan ini memungkinkan untuk mengukur jumlah dosis radiasi yang diberikan pada saat dipanaskan. Mekanisme pita energi yang dilalui dari pengaruh yang terjadi dapat digambarkan melalui sebuah model *traps* yang sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Jadi termoluminisensi adalah proses dimana, material yang dipapar, menyerap energi yang kemudian dipancarkan sebagai foton dengan panjang gelombang berada dalam area cahaya tampak dari spektrum gelombang elektromagnetik (Mc Kinlay, 1981).

Dalam sebuah kristal insulator ideal atau semikonduktor semua elektron berada pada level energi terendah pada pita valensi dan pita konduksi dalam keadaan kosong. Diantara kedua pita tersebut terdapat pita energi yang memisahkannya, yang disebut dengan pita terlarang. Sebuah elektron tidak dapat berada dalam pita terlarang dan juga hal tersebut sangat tidak memungkinkan elektron-elektron dapat melalui pita terlarang dengan kondisi yang normal.

Bagaimana pun, keberadaan struktur yang tidak sempurna atau pengotor dalam kristal menyebabkan keberadaan level energi atau *traps* pada pita terlarang seperti dua level energi yang ditunjukkan pada Gambar 1. Penyerapan sejumlah energi yang lebih besar dari besarnya energi pemisah (*energy gap*) memungkinkan elektron untuk bergerak dari pita valensi ke pita konduksi (langkah 1), sebagai hasilnya dalam pita konduksi jumlah elektronnya akan bertambah dan sebaliknya jumlah *hole* dalam pita valensi akan bertambah.

Dalam kasus TLD, radiasi ionisasi akan dapat memberikan besar energi tersebut kepada elektron. Sehingga elektron bergerak dari pita valensi ke pita konduksi dan pada pita konduksi elektron-elektron dapat bergerak dengan bebas. Oleh karena itu, *hole* (h) tetap di pita valensi (tanpa elektron) yang juga dapat bergerak di dalam kristal. Karena pengotor dan doping dari kristal, *traps* elektron (e^-) dan h tercipta dalam pita terlarang (*band gap*) antara pita valensi dan konduksi. Elektron dan *hole* baik yang bergabung atau yang terperangkap dalam keadaan metastabil (langkah 2 dan 2'). Sehingga e^- dan h terperangkap pada pengotor. Jika *traps* ini berada lebih dalam, elektron dan *hole* tidak akan memiliki cukup energi untuk melepaskan diri.

Selama kristal disimpan pada temperatur diatas temperatur nol mutlak ada kemungkinan probabilitas bahwa elektron akan mendapatkan energi tambahan yang cukup untuk kembali ke pita konduksi (langkah 3). Probabilitas ini meningkat dengan meningkatnya temperatur. Pemanasan kristal akan meningkatkan energi yang dimiliki oleh elektron dan *hole*. Setelah kembali ke pita konduksi, elektron dapat kembali bergabung dengan *hole* (langkah 4) dan kembali lagi ke keadaan alaminya (*ground state*), yang diiringi dengan pelepasan energi melalui emisi foton atau cahaya, yang disebut dengan lusen (Cameron et al., 1968)



Gambar 1. Salah satu kemungkinan mekanisme untuk termoluminisensi

Sebuah TLD dapat dianggap sebagai detektor integrasi dimana jumlah e^- dan h^+ , yang terperangkap, adalah jumlah pasangan e^-/h^+ yang dihasilkan selama proses paparan. Setiap pasangan e^-/h^+ yang terperangkap akan memancarkan satu foton. Jumlah foton yang dipancarkan sebanding dengan jumlah pasangan muatan yang bergabung, yang juga sebanding dengan dosis yang diserap kristal.

Dengan meningkatnya suhu, laju keluarnya elektron dari *hole* meningkat dan waktu paruh rata-rata e^-/h^+ berkurang. Angka ini mencapai maksimum pada suhu spesifik dan kemudian berkurang dengan cepat. Tetapi karena intensitas cahaya yang dipancarkan adalah proporsional dengan laju ini, dapat disadari, bahwa akan ada penciptaan puncaknya dalam grafik intensitas terhadap suhu, yang disebut puncak pancar (*glow peak*), dan grafiknya disebut kurva pancar.

2.4 Karakteristik Material TL

Meskipun ada lebih dari 2000 material TL yang tersedia, hanya 8 diantaranya digunakan sebagai material yang lebih tepat untuk mengukur dosis radiasi. Empat dari material tersebut memiliki nomor atom (Z) kecil dan digolongkan sebagai material yang ekuivalen dengan jaringan tubuh. Hal ini dikarenakan material tersebut memiliki respon yang mirip dengan jaringan manusia. Material ini adalah lithium fluorida (LiF), lithium borat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), berilium oksida (BeO) dan magnesium borat (MgB_4O_7). Pemanfaatannya digunakan untuk aplikasi medis serta untuk pemantauan personal pada aplikasi industri. Empat material lainnya memiliki respon relatif lebih bagus karena Z lebih tinggi. Jadi, materialnya memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dan digolongkan sebagai material yang tidak ekuivalen dengan jaringan tubuh manusia. Keempat material itu adalah kalsium sulfat (CaSO_4), kalsium fluorida (CaF_2), aluminium oksida (Al_2O_3) dan magnesium ortosilikat (Mg_2SiO_4) dan digunakan untuk pemantauan lingkungan.

Material TL tidak ideal untuk mengukur dosis. Banyak faktor yang harus dilakukan pertimbangan untuk menemukan material yang paling cocok. Ketersediaan secara komersial sangat penting serta stabilitas sinyal yang dihasilkan. Tingkat *fading* yang rendah adalah bagian yang paling penting (lebih rendah dari 5% per bulan) serta kurva pancar sederhana dengan siklus pemanasan yang jelas. Walaupun sensitivitas dari material setara jaringan dengan perbedaan yang tidak terlalu tinggi, dapat ditingkatkan dengan menambahkan pengotor yang disebut aktivator. Karena adanya pengotor lebih banyak dalam material, lebih banyak *traps* dicakup dan dengan demikian lebih banyak cahaya yang dipancarkan selama proses termoluminesensi. Oleh karena itu, efisiensi material meningkat. Kecuali untuk sensitivitas dan efisiensi yang tinggi, variasi rendah dari sinyal latar belakang diperlukan dengan tujuan untuk mengukur ambang batas dosis rendah dengan akurasi yang tinggi (dosis yang lebih rendah dari $100 \mu\text{Gy}$). Selain itu, respons energi yang rata dalam rentang yang lebih besar untuk berbagai energi yang diperlukan. Dosimeter ideal harus memiliki respon linier terhadap berbagai macam besar dosis dan responnya tidak terpengaruh pada laju dosis.

Dosimeter harus memiliki dimensi kecil agar mampu mengukur dosis titik dengan resolusi spasial tinggi.

Bahan yang paling banyak digunakan adalah LiF dengan pengotor magnesium dan titanium. TLD-100 adalah LiF: Mg, Ti yang terdiri dari 92.5% ^7Li dan 7.5% ^6Li (McKinlay, 1981). Ini adalah material TL yang digunakan dalam penelitian ini. Juga tersedia TLD-600, dengan lebih ^6Li banyak di dalamnya, dan TLD-700 yang hanya terdiri ^7Li saja. Sensitivitasnya untuk γ -ray adalah sama tetapi berbeda untuk neutron, seperti ^6Li memiliki koefisien penyerapan neutron termal yang tinggi.

MgB_4O_7 memiliki perilaku yang sama seperti LiF dengan sensitivitas yang lebih tinggi (5-10 kali lebih tinggi dari LiF). Kekurangannya adalah bahwa *pre-annealing* tambahan diperlukan untuk mengurangi *fading* karena sangat sensitif terhadap cahaya. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ memiliki sensitivitas yang kurang dibandingkan dengan LiF (1/10 kali LiF) dan hidroskopik. BeO adalah material yang lebih ekuivalen dengan jaringan tetapi memiliki sensitivitas yang hampir sama dengan LiF, beracun dan sangat sensitif terhadap cahaya.

Tabel 1. Karakteristik dosimetrik material TL yang berbeda (sumber: *handbook thermoluminescence of solids*, McKeever)

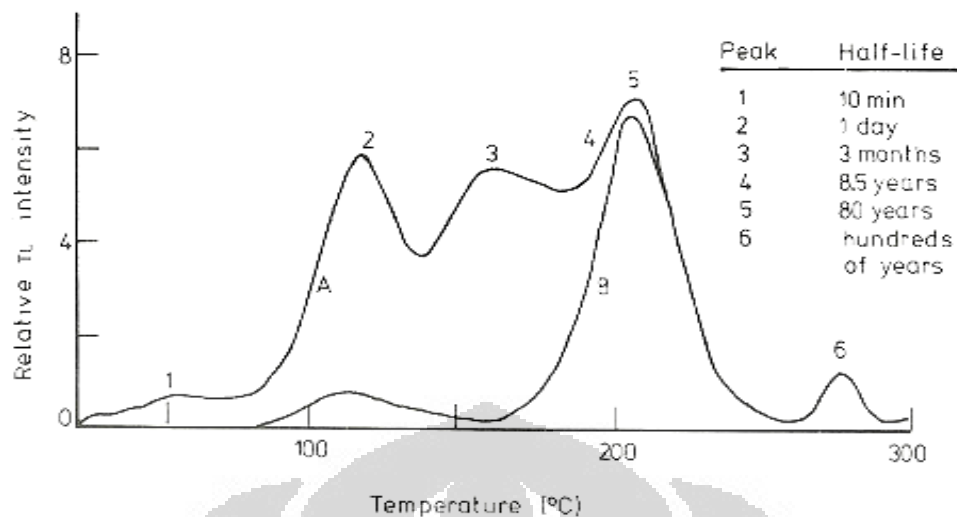
Material TL	Bentuk	Puncak Pancar ($^{\circ}\text{C}$)	Emisi maksimum (nm)	Z_{eff}	Sensitivitas relatif	Rentang linear (Gy)	<i>Fading</i>	<i>Annealing</i> (temperatur dan waktu)
LiF:Mg, Ti	serbuk, Chip, batang, disk	210	425	8.14	1	$5 \times 10^{-5} - 1$	< 5% per tahun	400 $^{\circ}\text{C}$ 1 jam + 80 $^{\circ}\text{C}$ 24 jam
LiF:Mg, Ti, Na	serbuk, disk	220	400	8.14	0.5		N/A	500 $^{\circ}\text{C}$ 0.5 jam
LiF:Mg, Cu, P	serbuk, disk, chip	232	310(410)	8.14	15-30	$10^{-5} - 12$	< 5% per tahun	240 $^{\circ}\text{C}$ 10 menit
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Mn	serbuk	210	600	7.4	0.15-0.40	$10^{-4} - 3$	5% dalam 2 bulan	300 $^{\circ}\text{C}$ 15 menit
Al_2O_3 :C	serbuk, disk	250	425	10.2	30	$10^{-5} - 1$	3% per tahun	300 $^{\circ}\text{C}$ 30 menit
CaSO_4 : Dy	serbuk, disk	220	480(570)	15.3	30-40	$10^{-5} - 30$	7-30% dalam 6 bulan	400 $^{\circ}\text{C}$ 1 jam + 80 $^{\circ}\text{C}$ 24 jam
CaF_2 : Dy	serbuk	200(240)	480(575)	16.3	16	$10^{-4} - 10$	25 % dalam 4 minggu	600 $^{\circ}\text{C}$ 2 jam
BeO	disk	180-220	330	7.13	0.70-3	$10^{-4} - 0.50$	7 % dalam 2 bulan	600 $^{\circ}\text{C}$ 15 menit

2.5 Sifat TL dari LiF

LiF merupakan halida alkali dengan nomor atom sama dengan 8.2 (Attix, 1986) (mendekati 7,4 dari jaringan manusia) dan digunakan secara luas untuk pemantauan personal. Material ini dapat ditemukan dalam banyak bentuk yaitu chip atau pelet, kristal tunggal, batang, bubuk, pita dan gel. TLD-100 yang sangat banyak digunakan adalah kristal LiF didoping dengan magnesium dan titanium. Magnesium digunakan untuk meningkatkan jumlah *traps* di kisi dan titanium digunakan untuk meningkatkan jumlah pusat lusen. TLD-100 diproduksi dengan leburan lithium fluorida, lithium cryolite, magnesium fluorida dan titanium litium fluorida. Ini memiliki sensitivitas yang tinggi dan puncak emisi sekitar 400 nm yang berada dalam panjang gelombang warna biru dari spektrum elektromagnetik. Dengan demikian, cahaya yang dipancarkan sesuai dengan respon dari fotokatoda dari PMT.

Karena *traps* dalam kristal LiF, intensitas TL sebagai fungsi dari suhu, memiliki sejumlah puncak pancar (*glow peak*). Pada awalnya dibangkitkan secara eksponensial, mencapai nilai maksimum dan kemudian berkurang dengan cepat. Dengan adanya *traps* yang banyak, puncak cahaya yang dihasilkan pun juga banyak dan grafik hasil plottan data tersebut disebut kurva pancar. Tinggi dan jumlah puncak dalam kurva pancar dari kristal tergantung pada jumlah pengotor dan *material defect* dan riwayat termal.

Pada kurva pancar TLD-100 ada 6 puncak pada temperatur yang berbeda (sampai 300°C) yang ditunjukkan pada Gambar 2. Puncak utama yang digunakan untuk pengukuran dosis adalah puncak yang ke-5. Puncak dosimetri harus memiliki suhu yang cukup besar agar tidak terpengaruh oleh temperatur ruang tetapi juga tidak tinggi agar tidak dipengaruhi oleh emisi benda hitam dari disk TLD. Waktu paruh dari masing-masing puncak juga ditampilkan pada Gambar 2.

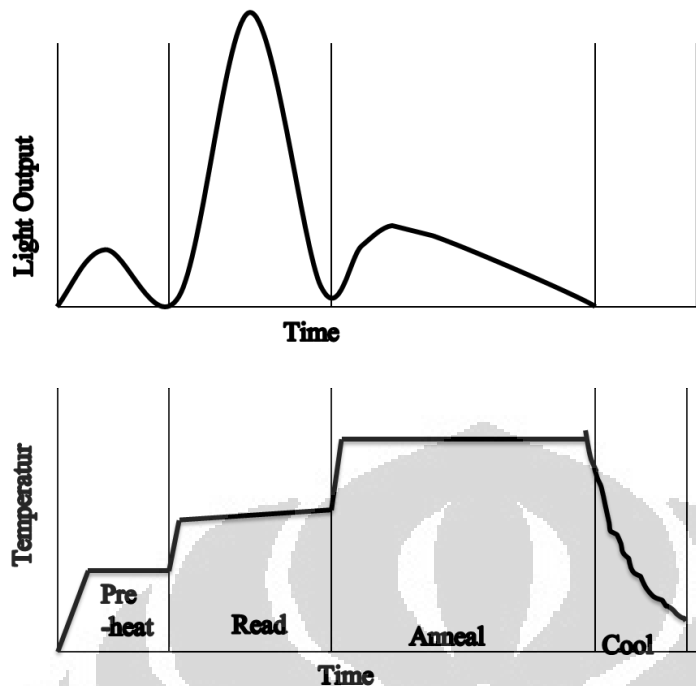


Gambar 2. Kurva pancar TLD-100 (A) – setelah prosedur pre-heating (B) waktu paruh dari masing-masing juga dapat dilihat

Fading yang terjadi cukup tinggi pada suhu rendah. Dengan demikian elektron memiliki energi yang cukup untuk meninggalkan *traps* dan tereksitasi kembali tanpa perlu panas. Hal ini mempengaruhi sensitivitas dosimeter tersebut. Ini juga dimungkinkan untuk mentransfer sensitivitas TL dari suhu rendah ke puncak dosimetri dengan pemanasan awal sebelum dibaca. Dengan demikian sinyal latar belakang akan dihapus dan karena itu, puncak dosimetri yang dihasilkan jauh lebih berbeda (Gambar 2-kurva B).

Setelah TLD dibaca kemudian dipanaskan untuk memastikan sinyal telah sepenuhnya dihapus dan TLD siap lagi digunakan. Untuk TLD-100 *annealing* tidak sederhana, pertama dipanaskan pada 400°C selama satu jam dan kemudian pada 80°C selama 16 sampai 24 jam. Atau juga bisa digunakan dengan prosedur *annealing* yang lain. Jika suhu *annealing* digunakan lebih dari 400°C sensitivitas material berkurang.

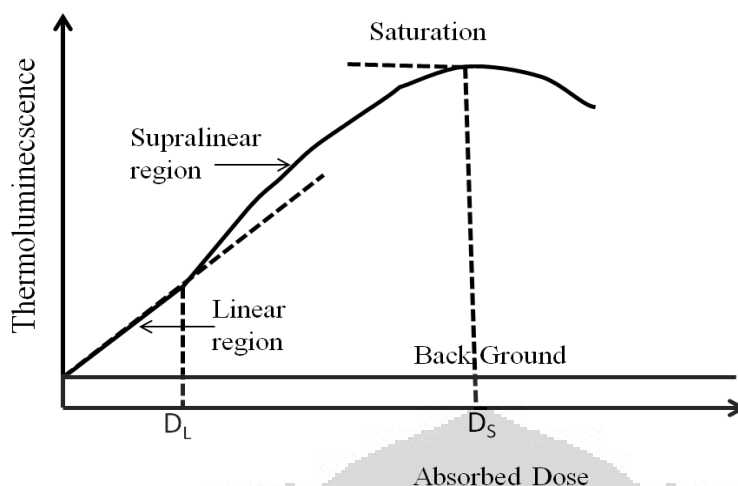
Area di bawah kurva pancar, setelah kalibrasi yang sesuai, berhubungan dengan dosis serap yang diukur dengan menggunakan TLD *reader*. Jika laju suhu konstan kurva pancar merupakan intensitas TL terhadap waktu. Reprodusibilitas yang bagus dari siklus pemanasan sangat penting untuk pengukuran yang akurat. Siklus pembacaan yang khas, yang meliputi pemanasan awal, pemanasan pada proses baca, *annealing* dan periode pendinginan, ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Model siklus pembacaan

Pada suhu yang lebih tinggi ($300-400^{\circ}\text{C}$) *pseudo* sinyal TL dihasilkan yang disebut "*Triboluminescence*". Sinyal ini dihasilkan karena kombinasi efek dari gas yang diserap, kotoran dan kelembaban dari material TL. Ini dapat dikurangi dengan menggunakan gas oksigen bebas, seperti nitrogen atau argon, yang dialirkan sekitar material TL selama siklus pembacaan. Masalah ini harus diperhatikan terutama untuk pengukuran laju dosis rendah.

Kurva respon dosis TLD-100 yang ditunjukkan pada Gambar 4. Intensitas TL adalah linier untuk dosis rendah (LiF sampai 1 Gy). Untuk dosis yang sama dengan nol sinyal TL adalah tidak nol, tetapi sama dengan sinyal latar belakang yang menentukan ambang batas dosis serap, yang dapat terukur dengan sebuah dosimeter. Untuk dosis yang lebih tinggi, respon dosimeter berubah menjadi supralinear. Sinyal meningkat mencapai saturasi disebut maksimum dan kemudian menurun dengan cepat.



Gambar 4. Sinyal TL terhadap dosis serap

Kejenuhan ini berkaitan dengan pengisian *traps* atau kerusakan awal radiasi. Dalam prakteknya 20% lebih sedikit dari dosis saturasi adalah batas maksimum. Jika lebih dari dosis ini dibutuhkan faktor kalibrasi dosis yang lebih banyak dan oleh karena itu kesalahan pengukuran dengan sendirinya terjadi peningkatan. Supralinearitas dan saturasi dapat menimbulkan masalah dari batas bawah dan atas nilai estimasi. Keduanya bisa terpengaruh terutama paparan radiasi. Oleh karena itu, penggunaan kembali dosimeter memiliki respon dosis yang berbeda.

Hanya sebagian kecil dari radiasi pengion mengenai TLD diserap sebagai dosis dan terukur dalam material TLD ketika dipanaskan. Dengan demikian, rasio cahaya TL yang dipancarkan per satuan massa selama dosis serap disebut efisiensi intrinsik dari TLD. Efisiensi intrinsik TLD-100 yang ditemukan sama dengan 0.039% sisa dosis, sekitar 99.6%, diubah menjadi radiasi termal. Itulah alasan utama mengapa kondisi reproduksibilitas sangat penting dipertahankan untuk bacaan dari TLD karena hanya sebagian kecil dari total energi yang disimpan sebenarnya diukur untuk menentukan dosis keseluruhan.

2.6 Batch

Batch TLD didefinisikan sebagai kelompok TLD yang berasal dari proses produksi dan memiliki riwayat penggunaan yang sama. Sebelum penggunaan *batch* TLD yang baru, serangkaian prosedur awal harus dilakukan agar hasil dari penggunaannya dilapangan memenuhi standar yang telah ditetapkan.

Homogenitas kelompok TLD dikaitkan dengan metode kontrol kualitas dari kelompok dosimeter baru yang akan digunakan. Beberapa uji kualitas dapat dilakukan dan setiap uji tersebut akan memberikan ketepatan (*precision*) yang cukup berbeda.

2.7 Stabilitas Sinyal Setelah Penyinaran

Satu pertimbangan penting dalam pemilihan sebuah dosimeter TL adalah stabilitas sinyal. Secara khusus diperlukan untuk menilai apakah muatan yang terperangkap selama penyinaran belum hilang sebelum pembacaan. Muatan yang hilang dapat disebabkan oleh paparan yang tidak diinginkan seperti panas (*thermal fading*), cahaya (*optical fading*), atau faktor lainnya (*anomalous fading*). Hal itu ditunjukkan oleh penurunan respon TLD yang bergantung pada waktu tunda yang memisahkan proses penyinaran dan pembacaan TLD.

Perlakuan *pre-heating* yang tepat dapat menghilangkan bagian dari sinyal (puncak pada rendah suhu) yang menunjukkan *fading* termal, dan kemudian mengurangi lebih besar *fading* termal untuk sebagian material TL (Tabel 2). Kecuali untuk jenis *reader* dengan model yang lebih lama pemanasan awal adalah bagian dari siklus pembacaan. Misalnya $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$, yang menunjukkan *fading* yang signifikan tanpa pemanasan awal, memiliki *fading* termal dalam orde hanya 2.5% per bulan bila dipanaskan dengan benar. Demikian juga LiF menunjukkan *fading* dalam orde 5 sampai 10% per tahun tergantung pada pembuatan dan pemanasan sebelumnya (Portal, 1981; Mc Keever, 1985).

Fading optik dapat dihindari dengan memanipulasi dosimeter di ruangan yang diterangi dengan cahaya pijar dan membungkusnya dalam kontainer buram atau amplop, ketika digunakan untuk dosimetri *in vivo*, ruang *treatment* diharapkan diterangi dengan lampu flouresen.

Kondisi penyimpanan TLD sebelum dibaca juga diperhatikan. Dengan kondisi suhu lingkungan tidak lebih dari 30°C dan juga dengan intensitas UV yang rendah dengan cara menutupi tempat penyimpanannya dengan plastik hitam.

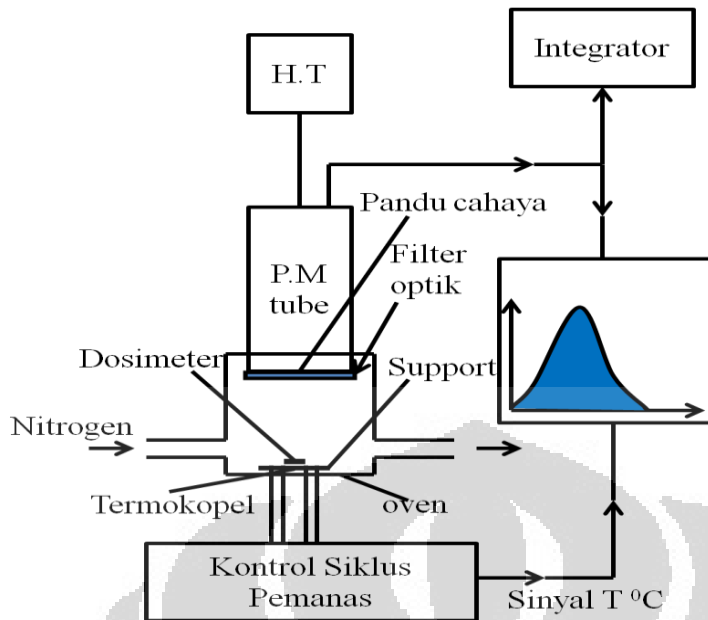
Tabel 2. *Fading* termal dari material TL yang berbeda setelah *preheating* (sumber: J. Van Dam dan G. Marinello, 2006)

Material TL	<i>Fading</i> Termal
LiF	5 – 10 % per tahun
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	2.5 % per bulan
Li ₂ B ₄ O ₇ : Cu (C.E.N.-FAR)	4 % per bulan
CaSO ₄ : Dy	1- 5% per bulan
CaSO ₄ : Mn	10 % per bulan
CaF ₂ : Dy	25 % per bulan
CaF ₂ : Mn	7 % per hari

2.8 TLD *Reader*

Diagram skematik *reader* TLD ditunjukkan pada Gambar 5. Dosimeter ditempatkan dalam sebuah batalan logam (*tray* atau *planchette*) yang dikondisikan dalam kamar baca. Kemudian dipanaskan dengan sebuah koil pemanas, yang bersentuhan baik dengan dosimeter dan *tray*. Sebuah termokopel jika digunakan untuk mengukur temperatur siklus pemanasan dalam kamar baca (*chamber*). Aliran gas digunakan untuk mengurangi sinyal yang dihasilkan dari pengotor dalam udara.

Proses termoluminisensi, cahaya diemisikan dan kemudian melewati filter optik, dan setelah itu masuk kedalam PMT melalui pandu cahaya dan akhirnya cahaya tersebut diukur. Karena keluaran dari PMT adalah sebanding dengan jumlah foton yang dihasilkan, itu juga akan menjadi sebanding dengan dosis serap ketika output diintegrasikan. Cacahan pulsa lebih mudah untuk dilakukan daripada integrasi sinyal. Ini berarti bahwa output dikonversi menjadi pulsa yang akan dicacah. Perangkat *reader* dihubungkan dengan sebuah PC dan hasil yang terukur dapat disimpan baik dalam *hard disk* PC atau *print out*.



Gambar 5. Diagram skematik dari sebuah pembaca TLD klasik

PMT terdiri dari fotokatoda yang mengubah cahaya menjadi arus. Kemudian arus diperkuat dalam PMT yang memberikan output yang dapat dengan mudah diukur. Kebanyakan fotokatoda memiliki sensitivitas puncak dengan panjang gelombang sekitar 400nm. Jadi, itu sangat penting untuk memilih material TL (fosfor) yang cocok, yang menghasilkan cahaya di daerah biru dari spektrum elektromagnetik. *Reader* TLD yang bagus harus memiliki transmisi cahaya yang lebar dan dapat mengukur material TL yang berbeda. PMT dengan respon yang rendah sebagian besar digunakan untuk mendeteksi cahaya tingkat rendah dari material TL.

Ada lebih dari satu cara untuk memanaskan material TL (dosimeter). Dalam Gambar 5 *tray* dan dosimeter berada dalam kontak dengan koil pemanas (elemen). Peningkatan temperatur juga dapat diproduksi dengan aliran arus listrik. Metode ini disebut pemanasan ohmik dan merupakan metode yang paling umum digunakan.

Cara lain untuk menaikkan suhu adalah metode non-kontak. Metode ini mencakup metode pemanasan dengan udara panas (gas nitrogen panas), pemanasan frekuensi radio (RF) atau metode pemanasan optik. Dalam pemanasan RF panas yang dihasilkan berasal dari arus induksi pemanasan kumparan RF. Dalam metode optik peningkatan suhu disebabkan karena lampu pemanas. Dengan menggunakan metode non-kontak yang reproduksibilitas panas lebih

mudah dan tidak ada kontaminasi yang dihasilkan antara *reader* dan dosimeter. Namun demikian, adalah lebih sederhana untuk mengontrol suhu menggunakan metode kontak.

2.9 Pemanasan (*Annealing*)

Sebelum penggunaan material TL untuk tujuan dosimetrik, material TL harus dipersiapkan terlebih dahulu. Untuk mempersiapkan material TL berarti bahwa menghapusnya dari semua informasi yang disebabkan oleh penyinaran sebelumnya atau radiasi dari lingkungan yang disebabkan karena penyimpanan material TL sebelum digunakan. Hal ini bertujuan untuk mengembalikannya lagi ke kondisi awal kristal seperti kondisi dimana material tersebut belum diradiasi. Persiapan juga ditujukan untuk menstabilkan struktur *traps* dari kristal.

Pemanasan (*annealing*) merupakan perlakuan termal yang dibutuhkan untuk membuang informasi radiasi yang tersimpan dalam material dosimetrik. Beberapa material TL membutuhkan prosedur pemanasan yang lebih kompleks, salah satu diantaranya LiF:Mg,Ti. Material tersebut membutuhkan temperatur pemanasan yang tinggi, diikuti dengan temperatur pemanasan yang rendah. Secara umum pembicaraan temperatur pemanasan yang tinggi dibutuhkan untuk membersihkan *dosimetric traps* dari sinyal residu yang mungkin menyebabkan cacahan latar belakang yang tidak diinginkan selama penggunaan dosimeter selanjutnya. Temperatur pemanasan yang rendah dibutuhkan untuk menstabilkan dan mengumpulkan *traps* pada temperatur rendah untuk meningkatkan sensitivitas dari *traps* dasar dosimetri dan untuk menghilangkan radiasi-mengiduksi sinyal disebabkan karena termal atau fading optik selama penggunaan. Kombinasi dari kedua pemanasan ini dimasukkan dalam proses standar pemanasan.

Pemanasan material TL sangat penting dilakukan ketika material TL baru akan digunakan untuk pertama kalinya. Pemanasan yang pertama memiliki tiga tujuan utama :

- Untuk menemukan kombinasi temperatur pemanasan yang bagus dan lama waktu untuk menghilang jika ada pengaruh dari radiasi sebelumnya.
- Untuk menghasilkan cacahan latar belakang/*background* intrinsik yang paling rendah dan sensitivitas yang tinggi.

- Untuk mendapatkan reproduksibilitas tertinggi dari sinyal TL dan latar belakang.

Sifat termoluminisensi yang ditunjukkan oleh fosfor lebih bergantung pada jenis perlakuan termal yang dilakukan pada detektor tersebut dibandingkan dengan proses radiasi yang dilakukan pada detektor tersebut. Bahkan kerusakan dapat dialami oleh material TL yang digunakan ketika mendapatkan perlakuan termal yang salah dengan kata lain melebihi batas suhu maksimal yang diperbolehkan. Jumlah kerusakan yang dialami juga bergantung pada laju pendinginan yang dilakukan untuk mendinginkan fosfor ke ambang batas temperaturnya. Ketika prosedur terbaik pemanasan ditentukan, contoh respon TL yang lebih tinggi dengan standar deviasi yang kecil, prosedur yang sama harus selalu diikuti untuk mendapatkan hasil yang sama pada penggunaan waktu berikutnya.

Tabel 3. Prosedur annealing untuk beberapa material TLD yang sering digunakan dalam aplikasi medis, personal monitoring, industri dan survei lingkungan

Material	Prosedur <i>Annealing</i>	
	Dalam Oven	Dalam Reader
LiF:Mg,Ti (TLD-100,600,700)	1 jam pada suhu 400°C + 2 jam pada suhu 100°C atau 1 jam pada suhu 400°C + 20 jam pada suhu 80°C Annealing cepat : 15 menit pada suhu 400°C + 10 menit pada suhu 100°C	30 detik pada suhu 300-400°C (+20 jam pada suhu 80°C dalam oven)
LiF:Mg,Ti pada PTFE (polyetrafluoroethylene)	1 jam pada suhu 300°C + 20 jam pada suhu 80°C	30 detik pada suhu 100°C (+ 20 jam pada suhu 100°C dalam oven)
LiF:Mg,Ti,Na(LiF-PTL)	30 menit pada suhu 500°C + pendinginan cepat	
LiF:Mg, Cu, P (GR200A)	10 menit atau 15 pada suhu 240°C	30 detik pada suhu 240°C
CaF ₂ : Dy (TLD-200)	1 jam pada suhu 600°C atau 30 menit pada suhu 450°C atau 1.5 jam pada suhu 400°C atau pada suhu 400°C + 3 jam pada suhu 100°C	30 detik pada suhu 400°C
CaF ₂ : Tm(TLD-300)	1.5 – 2 jam pada suhu 400°C atau 30 menit pada suhu 300°C	
CaF ₂ : Mn (TLD-400)	30-60 pada suhu 450-500°C	
CaSO ₄ : Dy (TLD-900)	0.5 – 1 jam pada suhu 400°C	
CaSO ₄ : Tm	15 menit pada suhu 400°C atau 600°C	30 detik pada suhu 400°C
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn (TLD-800)	15 menit – 1 jam pada suhu 300°C	

2.10 Ketidakpastian Pengukuran

Akurasi berhubungan dengan kedekatan pengukuran, dalam batas tertentu, dengan nilai sebenarnya dari kuantitas yang berada dalam pengukuran. Akurasi dari penentuan dosis dengan menggunakan TLD diberikan melalui perbedaan nilai dosis yang terukur (pada saat proses bacaan TLD dengan menggunakan TLD reader) dan nilai yang sebenarnya diberikan ke TLD.

Hal yang harus diingat disini adalah ini tidak selalu memungkinkan atau menjadi sebuah tindakan yang tepat untuk merejek beberapa dosimeter, seperti ketika *batch* yang terbatas. Dalam kasus ini semua sampel dijaga dan responnya dikoreksi menggunakan faktor sensitivitas intrinsik relatif (juga disebut faktor koreksi individual). Bagaimana pun juga, itu harus ditekankan bahwa baik beberapa atau lebih banyak sampel yang direjek atau semua *batch* sampel dipertimbangkan, faktor koreksi harus dikalkulasi dan digunakan untuk mendapatkan keseragaman terbaik dari respon *batch*.

Ada dua jenis dari ketidakpastian ini yaitu ketidakpastian tipe A dan tipe B untuk berbagai komponen yang berkontribusi ketidakpastian secara keseluruhan dari kalibrasi proteksi radiasi yang diturunkan, berdasarkan pada pengukuran dari beberapa jenis instrumen yang dikalibrasi dalam laboratorium.

Ketidakpastian tipe A dan tipe B keduanya merupakan standar deviasi yang diperkirakan, sehingga jika digabungkan menggunakan aturan statistik untuk menggabungkan variasi (yaitu kuadrat standar deviasi). Jika u_a dan u_b adalah kuantitas standar deviasi tipe A dan tipe B, berturut-turut, standar deviasi gabungan gabungan, u_c , yang kuantitasnya dapat ditentukan dengan:

$$u_c = \sqrt{(u_a^2 + u_b^2)} \quad (1)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

Detektor TL sebelum digunakan, dipanaskan terlebih dahulu sesuai dengan prosedur yang ditetapkan. Penyinaran TLD-100 untuk tujuan pengelompokan dilakukan di SSDL (*Secondary Standar Dosemetry Laboratorium*) menggunakan x-ray dengan teknik RQR dilakukan perbandingan dengan menggunakan cobalt 60. Dosimeter dibaca *reader* Thermo Scientific Harsaw model 3500. *Fading* diamati dengan cara memilih variasi respon TLD yang lebih sempit (0.05%), kemudian dibaca setelah 1-8 hari setelah penyinaran. Variasi pengaturan TTP dilakukan untuk mengamati hasil respon TLD.

3.1 Prosedur Pemanasan

Pemanasan kristal dapat dilakukan dalam oven dan/*furnace*, yang dapat dilakukan pengaturan suhu ke level yang telah ditentukan dan dijaga selama waktu yang telah ditentukan dan kemudian mendinginkan material TL sampai pada level suhu ruang.

Dosimeter ditempatkan dalam sangon yang tertutup atau rak-rak pemanas yang cocok (yang terbuat dari baja *stainless steel* atau alat penyepuh tembaga). Rak pemanas memungkinkan untuk pemisahan dan pengidentifikasian elemen-elemen dosimeter dan terutama sekali sangat berguna jika elemen-elemen ini akan dikalibrasi secara individual jika dibandingkan dengan pengkalibrasian secara kelompok. Rak pemanas yang telah diisi dengan dosimeter ditempatkan dalam tungku pembakar, panaskan dulu sampai suhu yang diinginkan. Lama pemanasan yang sebenarnya akan lebih lama dari waktu pemanasan yang dibutuhkan untuk mencapai keseimbangan termal ke temperatur yang dibutuhkan. Penambahan waktu ini harus ditentukan sebelum semua prosedur pengaturan dilakukan.

Dalam semua kasus prosedur pemanasan dilakukan dengan dua perlakuan termal, pertama pada temperatur tinggi yang kemudian diikuti dengan temperatur rendah, dosimeter didinginkan sampai temperatur ruang diakhir pemanasan yang pertama dan kemudian ditempatkan dalam oven yang dipanaskan terlebih dahulu untuk pemanasan yang kedua.

Prosedur pemanasan dan pendinginan selalu dilakukan dalam cara yang sama dan konstan. Proses ini dilakukan dengan cara yang sama selama prosedur pemanasan TLD. Hal ini penting untuk ketercapaian reproduksibilitas karena kurva pancar dari material sangat dipengaruhi oleh proses pendinginan.

Untuk Lithium florida proses standar pemanasan terdiri dari pemanasan pada temperatur tinggi 400°C selama satu jam dalam *furnace*. Kemudian pemanasan yang kedua sedikit berbeda yaitu 200°C selama dua jam. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan agar residu yang ada dapat terbuang dengan baik.

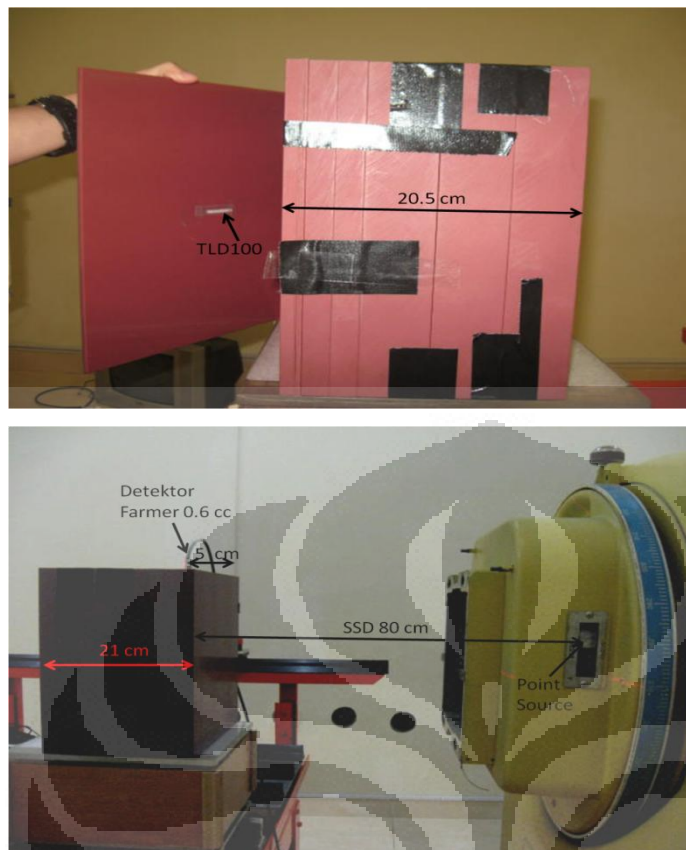
Proses pendinginannya dapat dilakukan dengan membiarkan pintu tungku pembakar atau oven terbuka setelah pemanasan dosimeter selesai dilakukan. Dengan cara ini proses pendinginan akan lebih lama atau lebih cepat, tergantung pada temperatur optimum yang telah ditetapkan, dalam penelitian ini adalah pada temperatur 400°C . Pilihan lainnya adalah, rak pemanas dikeluarkan dari tungku pembakar pada saat perlakuan termal selesai dilakukan untuk memungkinkan dosimeter didinginkan lebih cepat mencapai temperatur ruang. Ini dapat dicapai dengan menempatkan wadah pemanas pada lempengan logam. Uji harus dilakukan sebelum inisialisasi untuk menemukan cara pendinginan yang paling cocok sesuai kebutuhan utama pengguna. Tidak dianjurkan untuk mengganti metode pendinginan yang telah dipilih ke metode pendinginan yang lainnya dalam langkah-langkah atau pun prosedur pengukuran selanjutnya.

3.2 Penyinaran TLD

Sebelum dilakukan penyinaran terlebih dahulu dilakukan pengukuran dosis di udara menggunakan detektor. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa dosis yang akan digunakan sesuai dengan yang telah ditetapkan. Detektor standar yang digunakan dalam kalibrasi TLD ini adalah detektor dioda Unfors Xi. TLD ditempatkan pada posisi yang sama dengan detektor pada titik pengujian yaitu pada jarak 100 cm dari titik fokus tabung sinar x seperti yang diilustrasikan pada Gambar 9. Penentuan dosis sebesar 10 mGy, dilakukan dengan perhitungan lamanya waktu penyinaran yang digunakan untuk menyinari TLD dengan menggunakan detektor standar.

Pengelompokkan TLD berdasarkan responnya terhadap radiasi yang diberikan maka semua dosimeter yang akan digunakan disinari menggunakan sumber radiasi yang telah dikalibrasi. Dosimeter yang telah di-*annealing* kemudian dibungkus dengan plastik untuk memudahkan penempelannya agar tidak kotor saat menggunakannya. Setelah pengemasan TLD, kemudian dipersiapkan untuk penyinaran, sebelum disinari ditentukan terlebih dahulu besar dosis radiasi yang akan digunakan. Penentuan besar dosis sesuai dengan tujuan penggunaan dosimeter TL pada penggunaan radiodiagnostik, maka besar dosis yang digunakan mendekati dosis yang paling sering digunakan dalam tindakan tersebut. Dalam penelitian ini semua dosimeter diradiasi dengan menggunakan pesawat sinar x teknik *Radiation Qualities in Radiodiagnostic* dengan beberapa variasi tegangan tabung dan besar dosis sebesar 10 mGy. Untuk memastikan bahwa sumber yang digunakan bisa menghasilkan dosis yang dipilih maka dilakukan pengukuran dengan menggunakan detektor unfors. Detektor unfors yang diletakkan pada jarak yang telah ditentukan. Disini juga digunakan filter tambahan yang sesuai agar diperoleh kualitas berkas radiasi yang lebih baik. Pengukuran dilakukan dengan pengaturan yang sama dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi tegangan tabung. Hal ini bertujuan untuk memastikan kestabilan kinerja sumber yang digunakan dalam penelitian ini.

Untuk penyinaran TLD dengan pesawat Co-60 menggunakan teknik SSD 80 cm. Untuk mencacah laju radiasi digunakan detektor Farmer 0.6 cc yang diletakkan pada kedalaman 5 cm di dalam Solid Virtual Water Phantom. Namun pada saat penyinaran, TLD-100 diposisikan di kedalaman dosis maksimum, $D_{\max}=0.5$ cm. Ilustrasi penyinaran dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Ilustrasi penyinaran TLD-100 menggunakan pesawat Co-60

3.3 Prosedur Pengelompokkan TLD

Pengelompokkan TLD harus dilakukan untuk mengurangi variasi respon bacaan dosimeter selama penggunaan. Langkah pertama dari prosedur tersebut adalah pemanasan dosimeter. Di akhir prosedur pemanasan, dosimeter dibaca untuk memeriksa cacahan sinyal latar belakang (*background*). Prosedur awal ini dilakukan selama tiga kali pengulangan. Jika cacahan latar belakang dosimeter-dosimeter tersebut sangat rendah selama ketiga kali pengulangan, inisialisasi diakhiri dan dosimeter bisa digunakan untuk uji selanjutnya. Jika cacahan latar belakang dosimeter sangat bervariasi, inisialisasi dapat dilanjutkan untuk dua siklus perlakuan yang sama. Jika cacahan latar belakang yang didapatkan masih tinggi atau bervariasi maka efisiensi sistem pembaca harus diperiksa dan/atau dosimeter tidak digunakan.

Pada langkah selanjutnya dosimeter yang telah mendapatkan perlakuan termal kemudian diradiasi dengan sumber yang telah dikalibrasi. Semua sampel diradiasi dengan besar dosis diketahui. Sumber radiasi yang dikalibrasi tersebut

harus menunjukkan keseragaman berkas dan dipastikan semua sampel berada dalam lapangan radiasi. Pengelompokan dosimeter TL menggunakan sinar x dengan dosis sebesar 10 mGy. TLD yang dipilih akan dikelompokkan berdasarkan kemiripan sensitivitasnya terhadap radiasi yang diberikan.

Kemudian, setelah penyinaran semua dosimeter yang akan diuji dibiarkan minimal selama 30 menit sebelum dibaca, hal ini bertujuan untuk membuang puncak energi yang tidak stabil dalam *traps* kristal. Puncak energi yang tidak stabil ini dengan sendirinya akan terbuang karena elektron-elektron yang terperangkap berada pada level energi yang lebih dangkal. Dalam penelitian ini, untuk tujuan tersebut maka semua TLD yang akan dikelompokkan dibiarkan selama satu hari.

Setelah penyinaran, TLD dibaca untuk mengukur emisi TL dari setiap dosimeter (siklus pembacaan akan dipilih sesuai dengan yang pilihan terbaik terutama untuk jenis fospor). Semua TLD dibaca dengan TLD *Reader* Harsaw model 3500 yang terintegrasi dengan software WinREMS. Temperatur awal untuk pembacaan TLD adalah 50°C dengan suhu maksimum sebesar 260°C sesuai yang telah direkomendasikan. Laju kenaikan temperatur adalah sebesar 10°C/s dengan lama waktunya pembacaan TLD 26.67 s. Misalnya nilai emisi TL adalah sebesar

$$M_i \text{ dengan } i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

Sekarang TLD dipanaskan lagi dan baca lagi untuk mengukur bacaan nol/*zero-reading* (atau bacaan dosis nol). Nilai ini harus sama seperti yang telah ditentukan selama prosedur inisialisasi. Pada saat sinyal latar belakang lebih tinggi, karakteristik oven pemanas harus diperiksa (misalnya keseragaman temperatur dalam oven, disesuaikan antara pengaturan temperatur dan temperatur yang sebenarnya). Misalnya sinyal latar belakang adalah sebagai

$$M_{oi} \text{ dengan } i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

Bacaan bersih kemudian dapat ditulis

$$M_{i,net} = M_i - M_{oi} \text{ dengan } i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

Dalam deretan, nilai maksimum dan nilai minimum dapat diidentifikasi dan disubsitusikan kedalam persamaan :

$$\Delta_{max} = \frac{(M-M_o)_{max} - (M-M_o)_{min}}{(M-M_o)_{min}} \cdot 100 \leq 3\% \quad (5)$$

Dimana Δ_{max} menggambarkan indeks keseragaman untuk *batch* yang diberikan. Jika tidak sesuai atau tidak dapat menunjukkan hasil yang sesuai dengan Persamaan (4), artinya nilainya lebih besar dari 3% dari nilai tengah rata-rata respon, kemudian beberapa TLD harus dikeluarkan dari uji. TLD yang dikeluarkan harus menunjukkan sifat yang benar-benar tidak bisa untuk dimasukkan ke dalam pengujian.

Prosedur lain yang dapat digunakan dalam uji ini adalah dengan menggunakan nilai rata-rata keseluruhan hasil bacaan TLD yang telah diradiasi. Nilai rata-rata seluruh bacaan dapat dievaluasi dengan persamaan berikut :

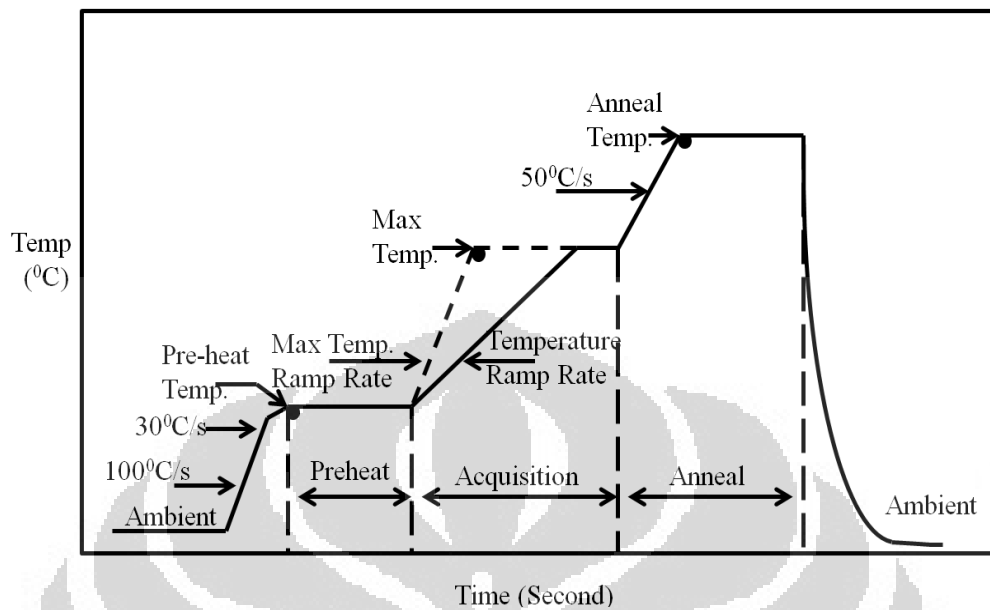
$$\bar{M} = \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - M_{oi})}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{M_{i,net}}{N} \quad (6)$$

Dan dua kuatitas berikut dievaluasi $\bar{M} - \sigma_p$ dan $\bar{M} + \sigma_p$ dimana σ_p merupakan penentuan awal dari standar deviasi. Riwayat sensitivitas individual dosimeter TL dianalisis. Dosimeter yang tidak digunakan jika sensitivitas yang ditunjukkannya berbeda dari nilai maksimum dan nilai minimum $\pm 3\%$, atau jauh lebih besar dari nilai tengah sensitivitas dari keseluruhan dosimeter TL yang diuji. Semua dosimeter yang menunjukkan bacaan bersih berada diluar rentang bacaan TL sebelumnya maka dosimeter tersebut tidak dapat digunakan dalam pengujian. Pengeluaran ini dilakukan dalam rentang bacaan karena sensitivitasnya lebih terbatas dibanding dengan standar deviasi yang didapatkan. Harus diingat bahwa penyaringan hanya bisa digunakan untuk menentukan apakah dosimeter tersebut dapat digunakan atau tidak dalam satu kelompok.

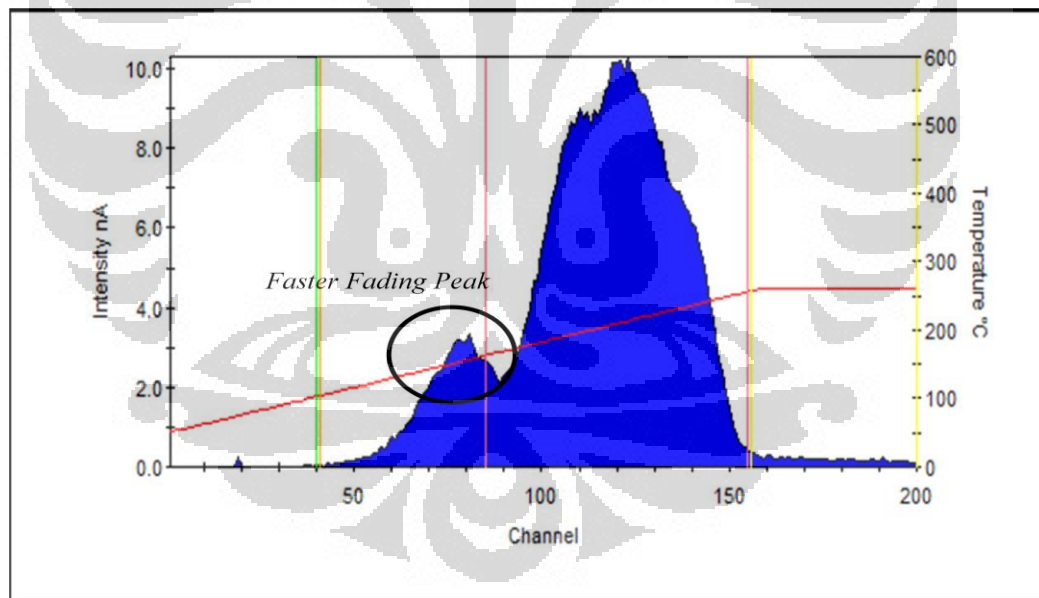
3.4 Pemilihan *Time Temperature Profile* (TTP)

TTP didefinisikan sebagai temperatur dimana material TL dipanaskan sebagai fungsi dari waktu. TTP dijelaskan dalam tiga bagian yaitu *Preheat* atau pemanasan awal, akuisisi, dan *anneal* atau pemanasan seperti pada Gambar 7. *Preheat* biasanya ditentukan sebagai *starting point* untuk dosimeter dalam satu kelompok dosimeter dan mungkin dapat digunakan untuk menghilangkan puncak pada temperatur rendah yang dikenal dengan *faster-fading* (pemudaran yang cepat) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Akuisisi adalah segmen dimana data dosimetrik diukur dan kurva pancar dihasilkan. Sedangkan bagian *anneal*

digunakan untuk menahan dosimeter pada temperatur tinggi untuk memastikan bahwa semua sinyal TL dikeluarkan dari material.



Gambar 7. Profile waktu terhadap suhu



Gambar 8. Kurva pancar dengan puncak yang tidak stabil pada temperatur rendah

Pemilihan pengaturan TTP yang dilakukan dalam penelitian ini sesuai dengan standar TTP yang direkomendasikan oleh Thermoscientific untuk pembacaan TLD-100 (LiF:Mg, Ti) seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 4. Rekomendasi TTP standar (sumber : manual book TLD reader 3500)

Material	TLD-100/600/700 (LiF:Mg, Ti)		TLD-100/600/700 (LiF:Mg, Ti)		TLD-100/600/700 (LiF:Mg, Ti)	
Bentuk	Batang/Rod		Chip		Kubus	
Ukuran	1.00 mm diameter 2.0-6.0 mm panjang		0.38mm/0.015" tebal 0.9mm/0.0035"tebal 3.2mm/0.125" persegi		1.0 mm persegi	
Dosis	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi
PRE-HEAT Temp Waktu	50 0	50 0	50 0	50 0	50 0	50 0
ACQUIRE Temp Maks Waktu Rate	260 26.67 10	300 33.33 10	260 26.67 10	300 33.33 10	260 26.67 10	300 33.33 10
ANNEAL Temp Waktu	260 0	300 0	260 0	300 0	260 0	300 0
Dosis rendah, aplikasi proteksi radiasi, < 100 mr Dosis tinggi, aplikasi terapi medis, > 1 r						

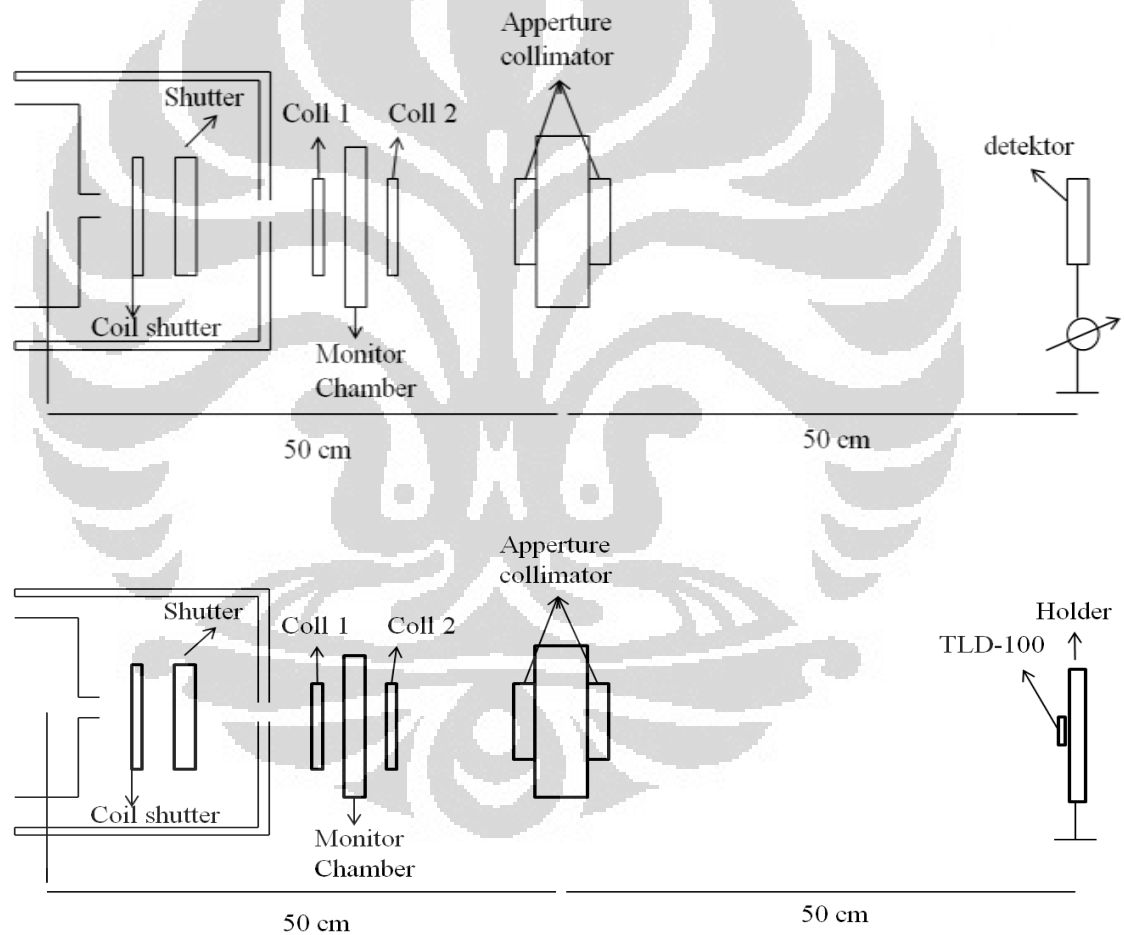
3.5 Penentuan faktor koreksi *Fading*

Detektor TL yang ditujukan untuk melihat efek *fading* disinari dengan teknik RQR7, tegangan tabung sinar x 70 kV, besar dosis sebesar 10 mGy. Efek *fading* yang ingin dilihat pada hari ke-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 setelah proses penyinaran. Detektor dipersiapkan dan dievaluasi (seperti halnya di-*annealing* dan dibaca) dalam kondisi lingkungan yang dapat dikontrol secara maksimal di laboratorium. Bagian kelompok detektor yang digunakan dalam efek *fading* ini diharapkan memiliki respon yang hampir sama untuk setiap detektor. Hal ini bertujuan agar keseragaman respon yang ditunjukkan tidak memiliki variasi yang signifikan. Selain itu, tingkat *fading* yang terjadi juga sangat rendah untuk jenis TLD-100. Kemudian setelah penyinaran, TLD dibaca sesuai dengan waktu yang telah disebutkan sebelumnya. Kondisi lingkungan dalam proses penyimpanan perlu diperhatikan. Seperti *thermal fading* yang bisa disebabkan detektor mendapatkan paparan panas yang cukup tinggi untuk mempengaruhi responnya. Kemudian intensitas sinar UV lingkungan yang menimbulkan *optical fading* pada material TL dapat diatasi dengan menutup tempat penyimpanan TLD.

BAB IV HASIL DAN DISKUSI

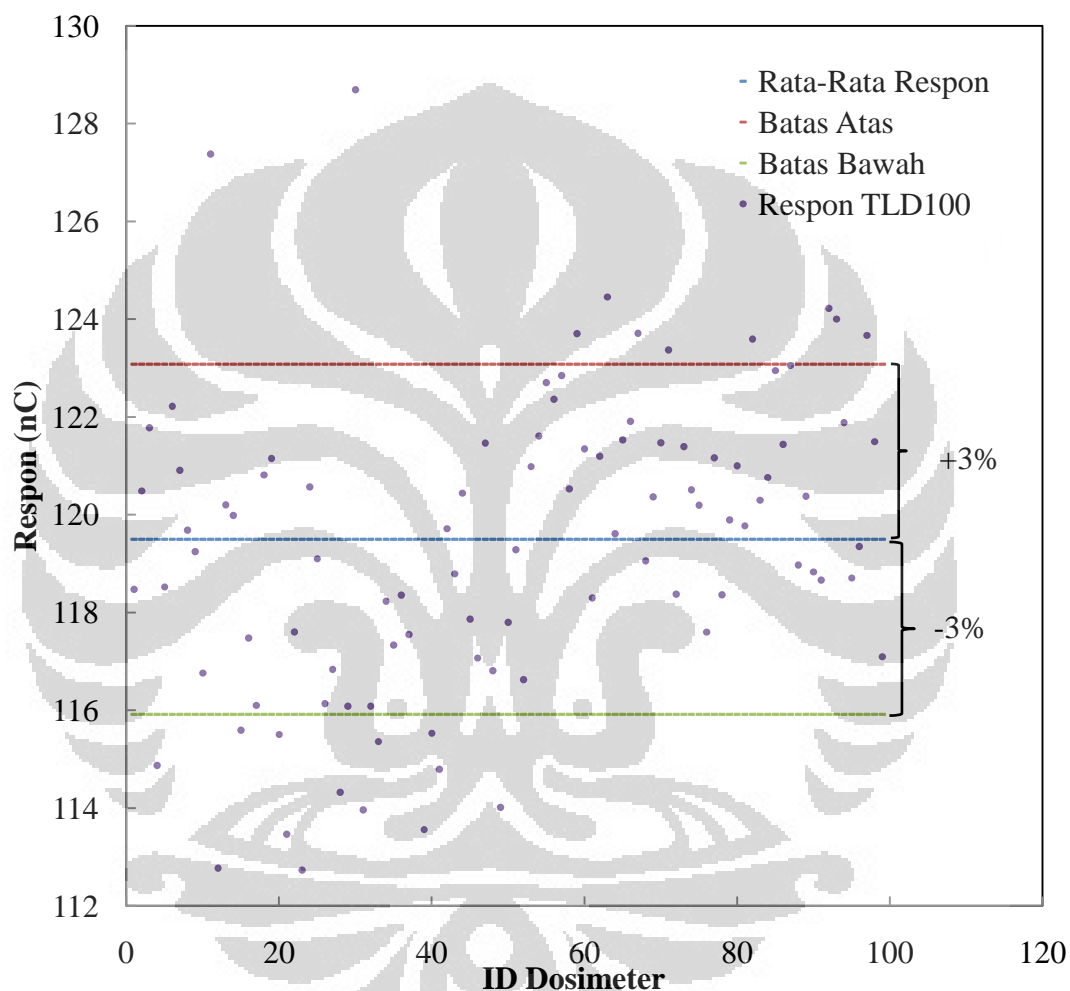
4.1 Pengelompokan TLD

TLD dikelompokkan berdasarkan responnya terhadap radiasi yang diberikan. Pengelompokan TLD ditujukan untuk memudahkan mendapatkan satu nilai faktor kalibrasi. TLD akan dikelompokkan dengan rentang respon sebesar $\pm 3\%$ dari nilai rata-rata respon terhadap besar dosis radiasi yang telah diberikan, dalam penelitian ini menggunakan sumber radiasi sinar x dengan dosis sebesar 10 mGy.



Gambar 9. Ilustrasi kalibrasi TLD di udara

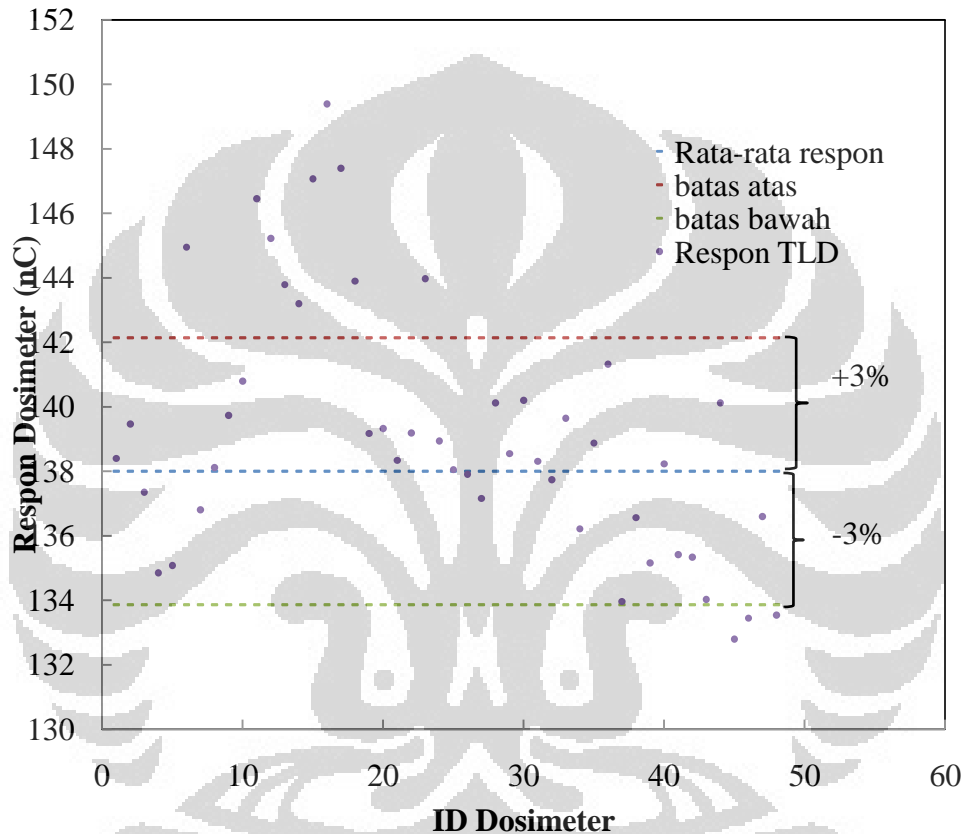
Nilai rata-rata respon bacaan TLD yang terukur menggunakan TLD *reader* Harsaw model 3500 adalah sebesar 119.625 ± 1.877 nC untuk kelompok yang pertama sebelum diseleksi dengan kriteria $\pm 3\%$ dari nilai rata-rata hasil bacaan TLD. Dari 99 TLD yang diradiasi kelompok yang pertama, didapatkan 75 TLD yang berada dalam ketentuan yang telah dipilih $\pm 3\%$ yang dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Respon TLD-100 untuk kelompok pertama

Sedangkan untuk kelompok TLD kedua yang digunakan nilai respon yang terukur adalah sebesar 137.852 ± 1.948 nC sebelum diseleksi dengan kriteria $\pm 3\%$ dari nilai rata-rata hasil bacaan TLD. Dari 48 TLD yang diradiasi, 35 TLD yang dapat digunakan untuk lebih lanjut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Kedua kelompok tersebut menunjukkan respon yang berbeda, walaupun dalam *batch* yang sama. Artinya kelompok TLD yang kedua lebih sensitif terhadap radiasi yang diberikan jika dibandingkan dengan kelompok yang pertama hal ini

ditunjukkan karena nilai cacahannya lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok yang pertama. Dengan kata lain TLD mampu menyerap foton lebih banyak jika dibandingkan dengan kelompok yang kedua. Hasil bacaan respon TLD akan mempengaruhi faktor kalibrasi yang akan dihitung selanjutnya. Pengelompokan ini pun bertujuan untuk lebih memudahkan pengerjaan kalibrasi dosimeter TL jika dibandingkan secara individual.



Gambar 11. Respon TLD-100 untuk kelompok kedua

Dalam penggunaan selanjutnya TLD kelompok yang pertama digunakan untuk dikalibrasi dengan tegangan tabung sinar x 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120 dan 150 kV dan dengan dosis radiasi sekitar 10 mGy. Sedangkan kelompok kedua digunakan untuk dosis radiasi sebesar 0.1, 1, dan 2 Gy menggunakan Co-60. Penyinaran TLD kedua ini untuk dosis tinggi disinari dengan RQR7 pada tegangan tabung 70 kV dan Co-60.

4.2 Koreksi Respon TLD Terhadap Perubahan Energi

Dosimeter yang telah dikelompokkan sebelumnya, dikalibrasi dengan menggunakan sumber radiasi sinar x. 75 TLD yang berada dalam satu kelompok, dibagi lagi menjadi 9 bagian (8 TLD setiap bagian). Setiap bagian dikalibrasi dengan kV sinar x yang berbeda. Salah satu bagian dikategorikan untuk mendapatkan kurva fading, dosimeter ini memiliki respon yang sangat bagus, yaitu dengan rentang $\pm 0.05\%$ dari nilai rata-rata respon dosis radiasi yang diberikan. Berdasarkan pengelompokkan ini didapatkan 11 TLD, 8 diantaranya digunakan untuk dibaca setiap hari setelah penyinaran dilakukan dan 3 TLD digunakan sebagai TLD kontrol. Bagian TLD ini disinari dengan teknik RQR7, dosis yang didapatkan setara sekitar 10 mGy.

Foton dengan energi < 100 keV, perbandingan koefisien massa penyerap energi dari kebanyakan material TL jika dibandingkan dengan udara, menurun dengan meningkatnya energi. Penjelasan dari fenomena ini bahwa beberapa dari distribusi dosis mikroskopik dengan foton yang menginduksi elektron sekunder, terletak dalam rentang supralinear dari kurva respon dosis.

Tabel 5. Respon dosimeter TL dan faktor kalibrasi dengan besar dosis 10 mGy pada beberapa tegangan tabung sinar x yang berbeda

Tegangan (kV)	Rata-rata respon bacaan TLD (nC)	Fk (mGy/nC)	KQo	$\pm u_c$
40	103.082	0.0970	1.302	5.7762%
50	98.411	0.1016	1.253	5.7717%
60	96.169	0.1040	1.170	5.7717%
70	123.369	0.0811	1	5.7710%
80	121.506	0.0823	1.015	5.7716%
90	120.001	0.0833	1.028	5.7707%
100	116.378	0.0859	1.060	5.7719%
120	112.384	0.0890	1.098	5.7704%
150	109.844	0.0910	1.123	5.7717%

Keterangan :

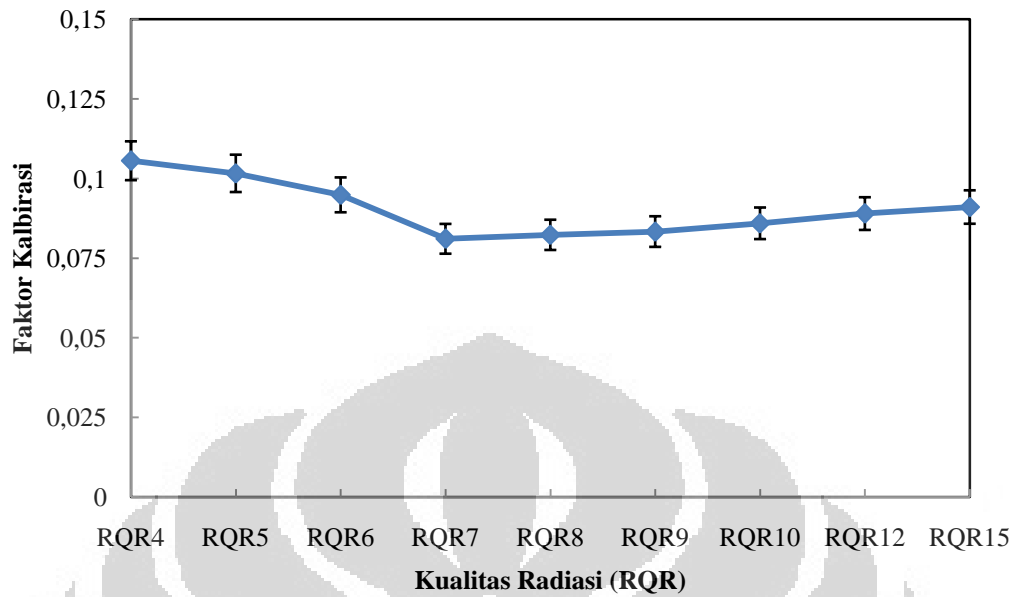
kV : tegangan tabung sinar x

Fk : Faktor Kalibrasi

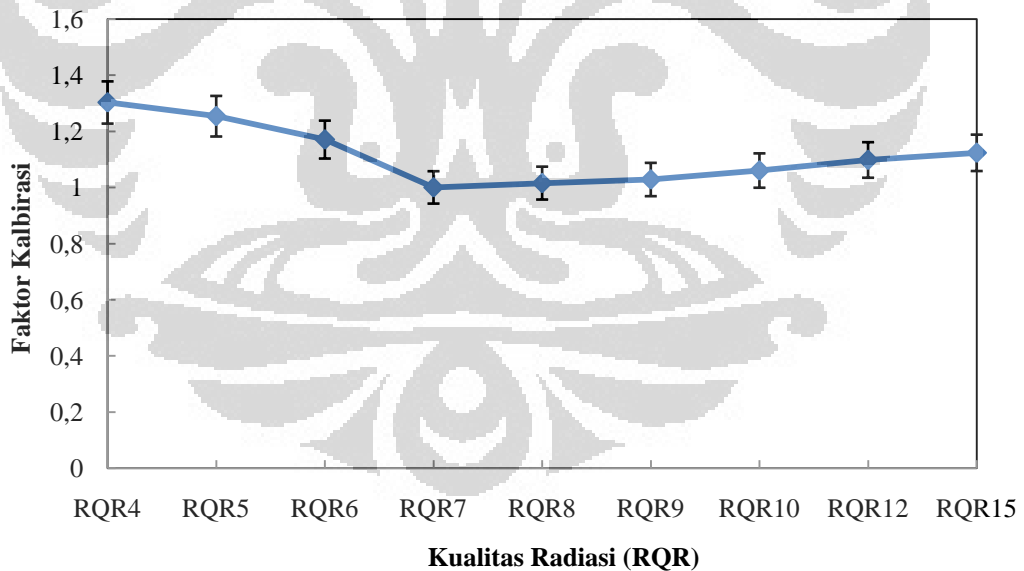
KQo : normalisasi kualitas radiasi referensi

u_c : ketidakpastian gabungan

Dengan u_c dihitung dengan persamaan (1)



Gambar 12. Grafik faktor kalibrasi terhadap tegangan tabung sinar x

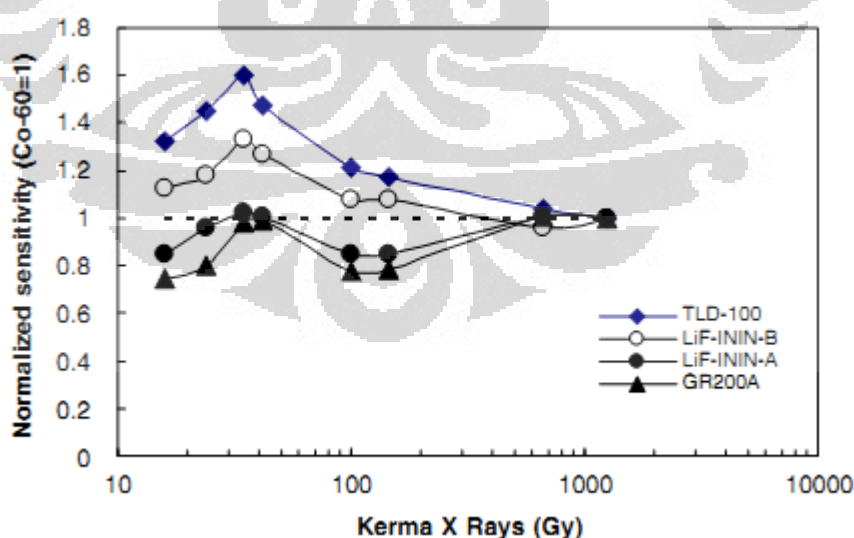


Gambar 13. Grafik faktor kalibrasi relatif terhadap referensi di RQR7

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa semakin besar tegangan tabung sinar x yang diberikan respon TLD akan semakin kecil. Hal tersebut disebabkan oleh semakin banyaknya foton yang dapat melewati TLD. Tetapi ketika tegangan

tabung 40 kV, 50 kV, 60 dan 70 kV TLD menunjukkan respon yang berbeda. Respon bacaan TLD semakin kecil, jika diamati lebih lanjut hal tersebut akan berkaitan dengan spektrum sinar x. Pada energi 40 kV, 50 kV, 60 kV dan 70 kV tersebut energi rata-rata foton yang berada pada region mendekati nilai-nilai tersebut, yang merupakan puncak tegangan, jumlah lebih banyak. Sehingga probabilitas foton yang bisa ditangkap oleh TLD lebih sedikit jika dibandingkan dengan energi sesudahnya. Dan untuk ketika tegangan tabung sinar x dinaikkan menjadi 70 kV spektrum sinar x mengalami perubahan. Distribusi foton yang memiliki energi lebih rendah dari energi rata-rata lebih banyak jika dibandingkan dengan energi yang lebih tinggi dari energi rata-rata tersebut. Dengan demikian probabilitas foton bisa ditangkap oleh TLD meningkat.

Hal yang sama juga ditunjukkan oleh P.R Gonzáles, dari semua detektor yang digunakannya respon tertinggi ditunjukkan ketika sinar x yang digunakan memiliki energi 34.3 keV. Dalam rentang energi ini, interaksi antara sumber dan detektor, TLD, yang dominan terjadi adalah efek fotolistrik. Hasil plot data yang diperolehnya dapat dilihat pada Gambar 14. Karena faktor kalibrasi berbanding terbalik dengan respon bacaan TLD. Secara tidak langsung hasil yang diperoleh tersebut menunjukkan pola yang sama.



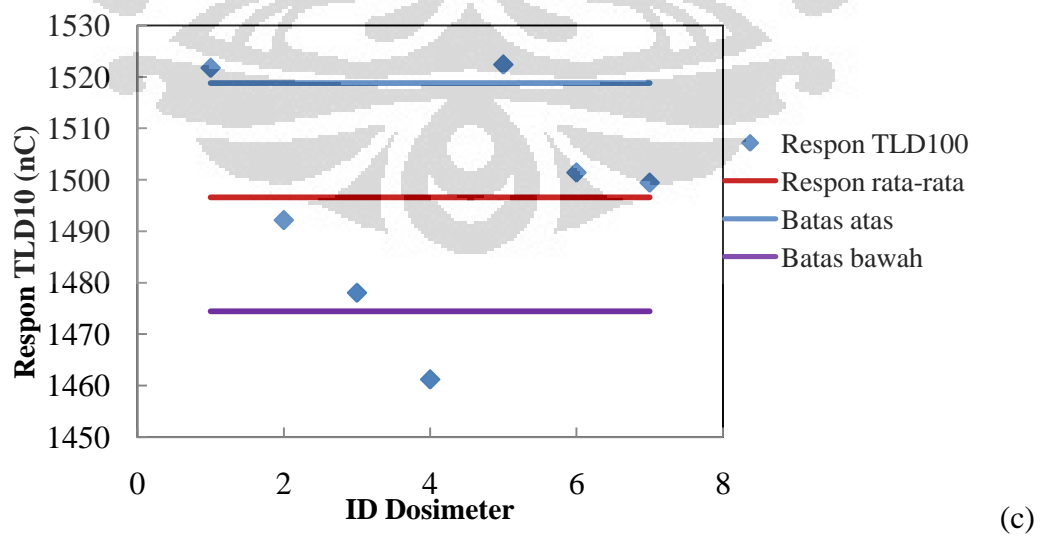
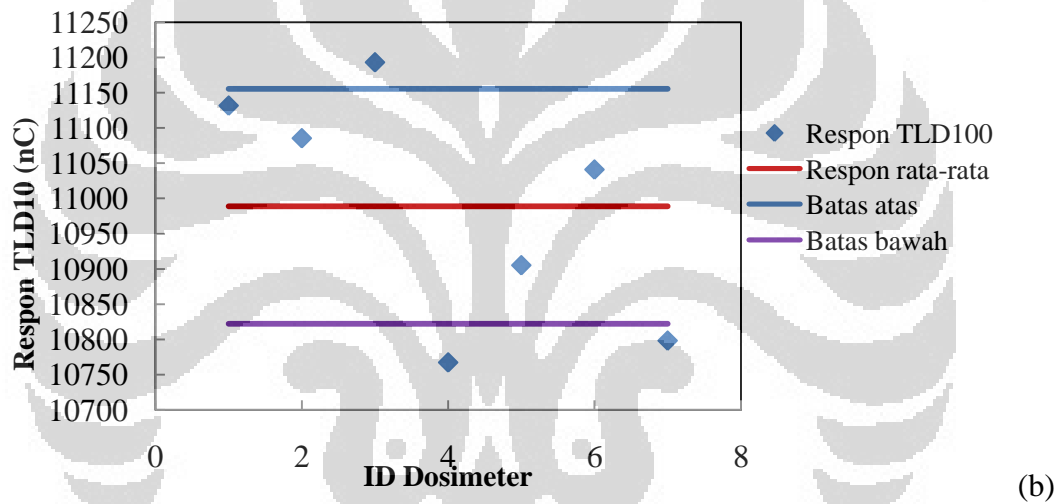
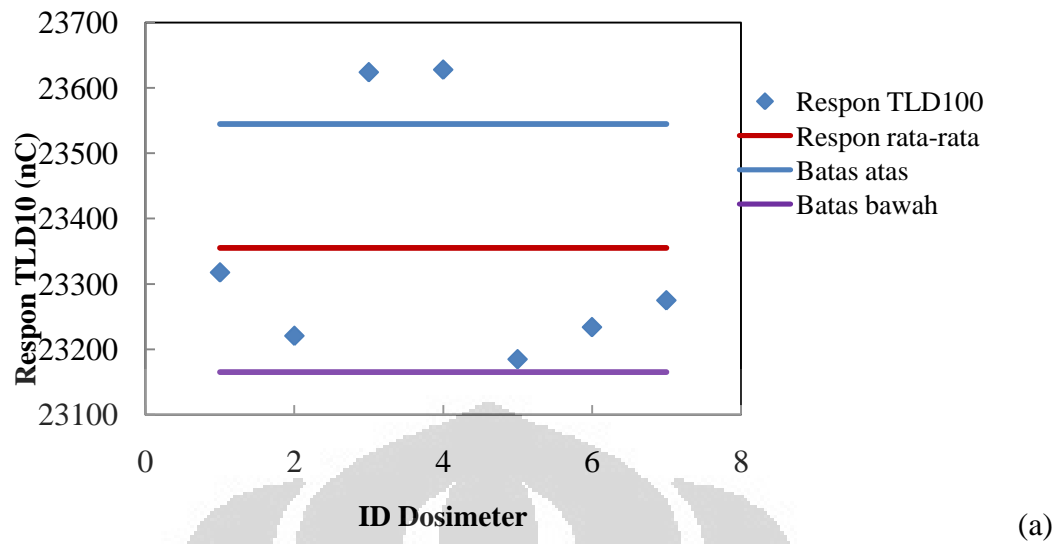
Gambar 14. Energy foton (sinar x) terhadap sensitivitas yang dinormalisasi (sumber: P.R Gonzáles *et. al*, 2006)

Hal tersebut di atas juga dipengaruhi oleh probabilitas pengisian level-level pusat *traps* TLD. Pengisian *traps* akan bergantung pada energi foton yang diberikan. Secara tidak langsung ini juga dipengaruhi oleh distribusi energi foton untuk setiap puncak tegangan yang digunakan. Ketika energi yang diberikan tinggi, tetapi dari segi distribusi energi foton dalam rentang itu sendiri, lebih banyak berada pada energi dibawah energi rata-ratanya maka foton yang dapat ditangkap oleh TLD lebih banyak lagi. Jika energi rata-rata yang diberikan rendah tetapi distribusi fotonnya yang mendekati energi tersebut maka foton yang ditangkap pun relatif lebih sedikit. Spektrum distribusi energi rata-rata sinar x dapat dilihat dalam referensi lainnya (Andika Rachmat; 2010).

Perbandingan relatif faktor kalibrasi dilakukan dengan mengambil RQR7 sebagai referensi dapat dilihat dalam Tabel 5. Maka didapatkan perbedaan relatif pada tegangan 40, 50 dan 60 kV terhadap referensi berturut-turut sebesar 1.30, 1.25 dan 1.17. Dan untuk tegangan tabung 80, 90, 100, 120 dan 150 kV berturut-turut sebesar 1.02, 1.03, 1.06, 1.10, dan 1.12.

Ketika menggunakan sumber yang berbeda, yaitu Co-60, respon material TL yang diperoleh sedikit berbeda. Nilai cacahannya relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan sinar x untuk besar dosis yang sama, 1 Gy. Hal ini disebabkan karena respon material yang bergantung pada besarnya energi foton yang diberikan. Energi Co-60 berupa sinar gamma memiliki energi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sinar x. Pada saat material TL diradiasi dengan sinar gamma maka foton yang dapat melewati target akan lebih banyak jika dibandingkan dengan sinar x.

Untuk menjaga keseragaman bacaan respon TLD maka dilakukan seleksi bacaan dari 7 sampel TLD yang dipakai dengan rentang deviasi antar bacaan sebagai batas atas dan batas bawah seperti yang terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik respon TLD-100 terhadap Co-60 dengan dosis 2 Gy (a), 1 Gy (b) dan 0.1 Gy (c)

Variasi dosis yang dilakukan menunjukkan bahwa respon TLD tidak bersifat linier dengan besar dosis yang diberikan. Ketika besar dosis yang diberikan dua kali dari besar dosis acuan, 1 Gy, respon bacaan TLD yang terukur adalah 2.11 kali dari dosis acuan. Pada besar dosis dijadikan sepersepuluh dari dosis acuan hasil bacaan respon TLD menunjukkan 0.14 kali dari dosis acuan. Hasil perbandingan dapat dilihat dalam Tabel 7. Hal ini menunjukkan bahwa respon TLD pada rentang dosis yang diujikan bersifat tidak linier.

Tabel 6. Perbandingan respon bacaan TLD dengan besar dosis yang berbeda

Dosis (Gy)	Respon bacaan TLD (nC)	Perbandingan
0.1	1492.77	0.14
1	11040.93	1
2	23246.52	2.11

Tabel 7. Perbandingan respon bacaan TLD-100 dengan besar dosis 1 Gy menggunakan pengaturan TTP untuk dosis tinggi

Co-60		Tegangan tabung sinar x (kV)					
		40		70		150	
ID dosimeter	Respon bacaan TLD (nC)	ID dosimeter	Respon bacaan TLD (nC)	ID dosimeter	Respon bacaan TLD (nC)	ID dosimeter	Respon bacaan TLD (nC)
B2_1	11131.9	B3_6	15950.25	B1_6	14552.72	B2_6	13685.82
B2_2	11085.58	B3_7	15767.19	B1_7	14549.04	B2_7	13700.25
B2_3	11193.39	B3_8	16041.81	B1_8	14512.08	B2_8	13714.36
B2_4	10767.11	B3_9	16084.72	B1_9	14452.35	B2_9	13999.81
B2_5	10905.18	B3_10	15785.77	B1_10	14767.72	B2_10	14197.08
B2_6	11041.08	--	--	--	--	--	--
B2_7	10798.09		--		--		
rata-rata	10988.9		15925.94		14566.78		13859.46
Perbandingan relatif terhadap sinar x			1.45		1.34		1.26

Perbandingan relatif respon bacaan TLD dengan menggunakan dua sumber yang berbeda, Co-60 dan sinar x, dapat dilihat dalam Tabel 8. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan pengaturan TTP yang sama yaitu pengaturan TTP untuk dosis tinggi. Perbedaan dari kedua sumber tersebut 1.45, 1.34 dan 1.26 berturut pada tegangan tabung 40, 70 dan 150 kV. Respon bacaan TLD menggunakan Co-60 relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan sinar x. Hal ini menunjukkan bahwa faktor kalibrasi bervariasi terhadap sumber yang digunakan, faktor kalibrasi untuk Co-60 relatif lebih besar jika dibandingkan dengan sinar x.

Tabel 8. Respon TLD-100 ketika diradiasi dengan pesawat Co-60 menggunakan SSD 80 cm dengan beberapa variasi dosis

Dosis (Gy)	ID Dosimeter	Respon TLD-100 (nC)	Fk (Gy/nC) $\times 10^{-5}$	--	
2	B1_1	23317.82	8.58	rata-rata	23246.52
	B1_2	23220.75	8.61	deviasi	51.266
	B1_5	23184.91	8.63	covarian	0.002
	B1_6	23234.06	8.61		
	B1_7	23275.07	8.59		--
	--				
1	B2_1	11131.9	8.98	rata-rata	11040.93
	B2_2	11085.58	9.02	deviasi	97.805
	B2_5	10905.18	9.17	covarian	0.009
	B2_6	11041.08	9.06		
	--				
0.1	B3_2	1492.163	6.70	rata-rata	1492.77
	B3_3	1478.041	6.77	deviasi	10.592
	B3_6	1501.415	6.66	covarian	0.007
	B3_7	1499.443	6.67		--

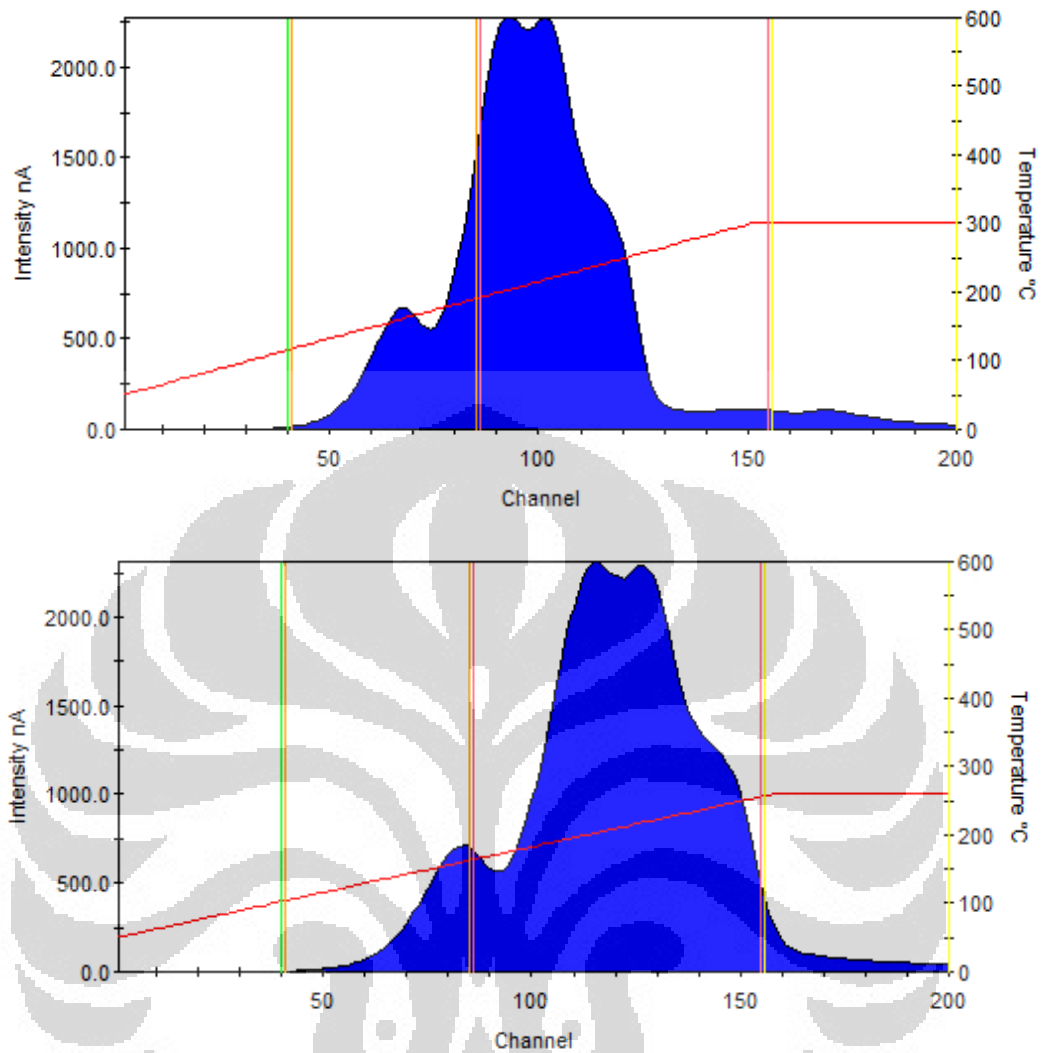
4.3 Pengaruh Pemilihan Pengaturan TTP

Temperatur Time Profile sangat mempengaruhi hasil bacaan respon dosimeter TL. Masing-masing jenis material membutuhkan pengaturan TTP bergantung pada besar dosis, dosis rendah dan dosis tinggi. Karena hal ini akan mempengaruhi jumlah elektron yang dikeluarkan pada saat proses pembacaan.

Agar elektron dapat keluar dari *traps*-nya dibutuhkan energi yang cukup sebesar selisih energi kedalamannya. Semakin jauh kedalaman *traps* elektron maka energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron juga akan semakin besar. Artinya dengan bertambah besarnya temperatur maka elektron yang berada pada *traps* yang lebih dalam probabilitas untuk keluar dari *traps*-nya akan semakin besar. Pada penggunaan TLD dengan tujuan dosis tinggi temperatur yang digunakan lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan TLD untuk dosis yang rendah. Besar temperatur maksimum yang diberikan berturut-turut sebesar 260°C dan 300°C. Ketika TLD digunakan untuk tujuan dosis tinggi, dibaca dengan pengaturan TTP untuk dosis rendah maka tidak semua elektron yang berada dalam *traps* dapat dikeluarkan secara optimal. Dengan kata lain, proses pembacaan tersebut ada kehilangan informasi besar dosis yang diserap oleh TLD.

Tabel 9. Respon TLD-100 dosis radiasi 1Gy dengan pengaturan TTP yang berbeda

Pengaturan TTP	TTP untuk dosis rendah					TTP untuk dosis tinggi				
Tegangan (kV)	ID dosimeter	Respon TLD (nC)	Dosis (Gy)	FK (10^{-5})	Dev (10^{-7})	ID dosimeter	Respon TLD (nC)	Dosis (Gy)	FK (10^{-5})	Dev (10^{-7})
40	B3_1	15598.84	1.014	6.50	9.43	B3_6	16173.55	1.014	6.27	5.72
	B3_2	15323.07	1.014	6.62		B3_7	15987.93	1.014	6.34	
	B3_3	15242.48	1.014	6.65		B3_8	16266.39	1.014	6.20	
	B3_4	15214.01	1.014	6.66		B3_9	16309.91	1.014	6.22	
	B3_5	15702.76	1.014	6.46		B3_10	16006.77	1.014	6.33	
70	B1_1	14009.06	1.0057	7.18	8.79	B1_6	14636.05	1.0057	6.87	5.62
	B1_2	14141.82	1.0057	7.11		B1_7	14632.35	1.0057	6.87	
	B1_3	14441.4	1.0057	6.96		B1_8	14595.17	1.0057	6.89	
	B1_4	14213.45	1.0057	7.08		B1_9	14535.1	1.0057	6.92	
	B1_5	14025.52	1.0057	7.17		B1_10	14852.28	1.0057	6.77	
150	B2_1	13443.08	1.0072	7.49	8.60	B2_6	13783.9	1.0072	7.31	11.9
	B2_2	13325.73	1.0072	7.56		B2_7	13798.43	1.0072	7.30	
	B2_3	13541.34	1.0072	7.44		B2_8	13812.64	1.0072	7.29	
	B2_4	13166.95	1.0072	7.65		B2_9	14100.14	1.0072	7.14	
	B2_5	13234.77	1.0072	7.61		B2_10	14298.83	1.0072	7.04	



Gambar 16. Kurva pancar TLD-100 dengan pemberian dosis 1 Gy menggunakan Co-60 (atas) dibaca dengan pengaturan TTP untuk dosis tinggi dan (bawah) pengaturan TTP untuk dosis rendah.

Suhu yang terlalu rendah tidak cukup untuk melepaskan elektron-elektron yang terperangkap secara optimal. Semakin dalam tempat terperangkapnya elektron maka dibutuhkan juga energi termal yang tinggi, agar elektron-elektron tersebut memiliki energi yang lebih untuk melepaskan diri dari *traps*-nya. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 16, dari kedua tersebut terlihat dengan jelas ketika TLD diberikan dosis tinggi dan pada saat pembacaan responnya tidak semua informasi dosimetrik dapat diperoleh ketika menggunakan pengaturan TTP yang ditujukan untuk dosis rendah.

Lama proses pembacaan pun juga ikut mempengaruhi hasil bacaan dosimeter TL. Dari penelitian yang dilakukan perbedaan tersebut dapat dilihat dengan jelas. Dengan kata lain laju temperatur pada saat pembacaan dosimeter TL juga akan mempengaruhi hasil bacaan.

Sebagai bahan perbandingan dalam hal respon TLD-100 terhadap jenis sumber radiasi yang berbeda, maka dilakukan penyinaran dengan menggunakan pesawat Co-60 dengan beberapa variasi dosis; 2 Gy, 1 Gy dan 0.1 Gy. Besar respon yang diberikan dengan dua pengaturan TTP yang berbeda, Pengaturan TTP untuk dosis tinggi dan Pengaturan TTP dosis rendah, dapat dilihat dalam Tabel 10. Dari hasil penyinaran dengan Co-60 yang didapatkan ternyata respon TLD-100 jika dibandingkan dengan sinar x relatif lebih kecil.

Tabel 10. Respon TLD-100 menggunakan Co-60 dengan beberapa variasi dosis

Dosis (Gy)	TTP Dosis tinggi				TTP dosis rendah			
	ID Dosimeter	Respon TLD (nC)	FK (Gy/nC) $\times 10^{-5}$	Deviasi $\times 10^{-7}$	ID Dosimeter	Respon TLD (nC)	FK (Gy/nC) $\times 10^{-5}$	Deviasi $\times 10^{-6}$
2	B1_1	23317.8	8.58	6.97	B1_8	22080.9	9.06	1.26
	B1_2	23220.8	8.61		B1_9	21952.9	9.11	
	B1_3	23624.4	8.47		B1_10	22544	8.87	
	B1_4	23628.3	8.46		---			
	B1_5	23184.9	8.63		---			
	B1_6	23234.1	8.61		---			
	B1_7	23275.1	8.59		---			
1	B2_1	11131.9	8.98	0.14	B2_8	10472.4	9.55	0.94
	B2_2	11085.6	9.02		B2_9	10682.7	9.36	
	B2_3	11193.4	8.93		B2_10	10593.3	9.44	
	B2_4	10767.1	9.29		---			
	B2_5	10905.2	9.17		---			
	B2_6	11041.1	9.06		---			
	B2_7	10798.1	9.26		---			
0.1	B3_1	1521.76	6.57	9.90	B2_8	1526.71	6.55	1.06
	B3_2	1492.16	6.70		B2_9	1484.42	6.74	
	B3_3	1478.04	6.77		B2_10	1486.66	6.73	
	B3_4	1461.2	6.84		---			
	B3_5	1522.4	6.57		---			
	B3_6	1501.42	6.66		---			
	B3_7	1499.44	6.66		---			

Pengaruh pengaturan TTP memberikan perbedaan rasio bacaan dosis rendah terhadap dosis tinggi pada TLD yang berdampak nilai faktor kalibrasi TLD berubah sebesar 1.05, 1.03, dan 1.05 berturut dengan tegangan tabung 40, 70 dan 150 kV, sedangkan untuk cobalt 60 dengan variasi dosis 2, 1, dan 0.1 Gy perbandingannya sebesar 1.05, 1.04, dan 1.00

4.4 Efek *Fading*

Fading adalah suatu proses dimana terjadi kehilangan informasi yang tersimpan yang secara alami karena paparan termal suhu lingkungan TLD. Banyak penyebab yang dapat memicu terjadinya hal tersebut, namun yang paling utama adalah efek termal. Pada termal *fading*, elektron yang berada pada *traps* yang lebih dangkal akan keluar dengan cepat jika dibandingkan dengan *traps* yang lebih dalam, hal ini karena probabilitas keberadaan transisinya lebih besar. Elektron dapat keluar dari *traps*-nya karena mendapatkan energi yang cukup untuk melepaskan diri dari *traps* yang lebih dangkal dari lingkungan disekitar berupa energi termal. Hal ini dapat menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih besar dalam penilaian dosis pasca penyinaran.

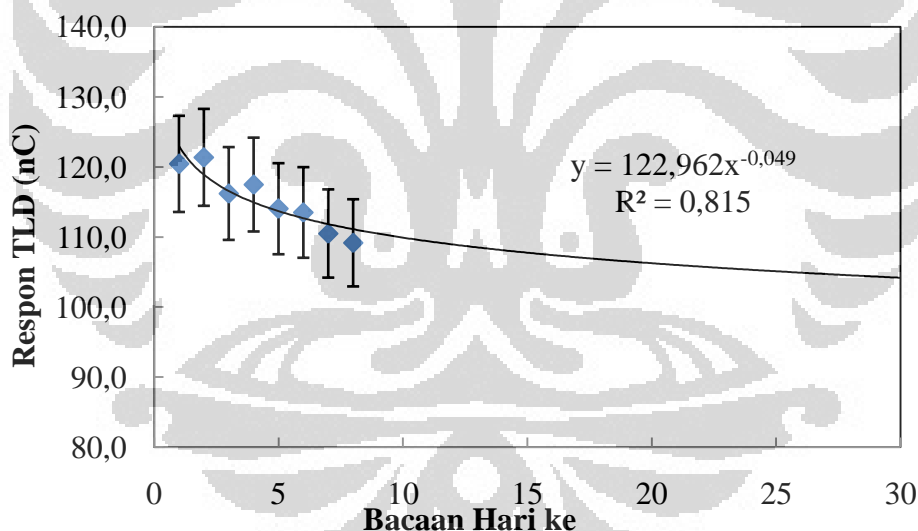
Efek *fading* yang diberlakukan terhadap dosimeter yang digunakan diamati dengan cara membiarkannya terjadi secara alamiah, tanpa memberikan tindakan tambahan seperti *pre-annealing* pada saat siklus pembacaan material TL. Namun, dalam hal ini kondisi selama penyimpanan diperhatikan, seperti suhu penyimpanan tidak lebih dari 30°C, dengan kelembapan yang tidak terlalu tinggi ($\leq 50\%$), dan dengan intensitas sinar UV yang rendah. Diharapkan semua parameter-parameter yang disebutkan itu dapat dikontrol dengan baik. Kekonsistenan parameter-parameter tersebut sangat mempengaruhi hasil yang diperoleh, selain itu. Hal tersebut memungkinkan untuk mendapatkan hasil sesuai dengan yang diharapkan dengan tujuan hasil tersebut dapat dibandingkan satu sama lainnya. Dan juga tingkat keakuratan yang didapatkan relatif lebih baik jika dibandingkan dengan tidaknya terkontrolnya parameter-parameter tersebut.

Data pengukuran yang didapatkan dapat dilihat dalam Tabel 12. Kemudian data diplot dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 17. Dari grafik ini diharapkan akan memberikan suatu faktor koreksi *fading* ketika

dosimeter dibaca pada hari ke-n setelah penyinaran. Faktor *fading* ini dikalikan dengan nilai cacahan yang diperoleh pada pembacaan dosimeter TL ketika akan menentukan seberapa besar dosis respon dosimeter yang diukur.

Tabel 11. Respon dosimeter TL saat dibaca pada hari yang berbeda setelah penyinaran menggunakan sumber sinar x

Hari	Respon TLD (nC)	$\pm u_c$
1	120.435	5.776%
2	121.368	5.772%
3	116.208	5.772%
4	117.484	5.771%
5	114.034	5.772%
6	113.500	5.771%
7	110.498	5.772%
8	109.163	5.770%



Gambar 17. Kurva Fading hasil ekstrapolasi dari 8 hari bacaan TLD

Dari data yang diperoleh terjadi penurunan 7% ekstrapolasi 365 hari pengamatan dan secara matematis diperoleh persamaan $y = 122.962 x^{-0.049}$. Persamaan ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengestimasi seberapa besar *fading* yang dialami oleh TLD selama penyimpanan. Dengan adanya kurva *fading* ini akan memudahkan koreksi *fading* yang dialami TLD sehingga hasil bacaan respon yang didapatkan ketika pengukuran akan lebih akurat lagi. Dari

pengamatan yang dilakukan waktu optimum untuk membaca TLD adalah tujuh hari setelah penyimpanan. Karena penurunan puncak energi pada temperatur rendah relatif mulai konstan.

Pengamatan *fading* yang dilakukan pada hari kedua dan keempat setelah penyinaran hasil bacaan respon TLD relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan hari sebelumnya. Tetapi dalam menentukan persamaan fading, data tersebut tidak dapat dikeluarkan dari uji data. Jika ketidakpastian juga turut dipertimbangkan maka hasil pengukuran tersebut masih berada dalam satu kelompok. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17 bahwa semua TLD dalam pengukuran masih berada dalam satu kelompok.

4.5 Pertimbangan Statistik

Tabel 12. Ketidakpastian tipe A dan Tipe B untuk semua tegangan tabung yang digunakan

Tipe A	Tegangan (kV)	1 %
	<i>Timer Generator</i>	4%
	<i>Suhu Reader</i>	0.25%
	PMT	1%
	Detektor Unfors	2%
Tipe B	Jarak sumber-detektor	1%
	Ketegaklurusan	1%
	<i>Grouping TLD</i>	3%

Tabel 13. Ketidakpastian gabungan untuk setiap tegangan tabung sinar x

Ketidak-pastian	Tipe B	Total
Tegangan (kV)	Covarian bacaan	u_c
40	0.260%	5.7762%
50	0.125%	5.7717%
60	0.122%	5.7717%
70	0.086%	5.7710%
80	0.121%	5.7716%
90	0.062%	5.7707%
100	0.133%	5.7719%
120	0.030%	5.7704%
150	0.124%	5.7717%

Perhitungan ketidakpastian tidak dilakukan untuk setiap instrumen yang terkalibrasi di laboratorium. Ketidakpastian tipe A dan tipe B yang konstan untuk semua tegangan tabung yang digunakan dapat dilihat dalam Tabel 13. Secara keseluruhan ketidakpastian yang diperoleh dalam penelitian ini rata-ratanya adalah sebesar 5.77% yang dapat dilihat dalam Tabel 14. Dari keseluruhan ketidakpastian tersebut sumber terbesar yang menyumbang ketidakpastian secara keseluruhan adalah ketidakpastian tipe A. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran sangat bergantung pada alat-alat yang digunakan. Variasi dari bacaan respon TLD untuk setiap tegangan tabung yang diberikan relatif kecil. Dengan kata lain dengan pengelompokkan dalam rentang $\pm 3\%$ dari rata-rata respon keseluruhan sudah merupakan batasan yang bagus. Ketidakpastian ini akan dapat ditingkatkan lagi jika ketidakpastian dari alat-alat ukur dapat ditekan dalam batas yang lebih kecil lagi.

Penurunan distribusi energi untuk sinar x yang diemisikan melalui sampel yang diberikan pada bergantung pada energi yang diatur untuk setiap sinar x yang terdeteksi. Dari pengaturan besarnya tegangan tabung sinar x yang diberikan untuk setiap besar energi yang ditentukan berdasarkan sertifikat kalibrasi pesawat sinar x menyumbang sebesar 1 % ketidakpastian pada hasil bacaan respon TLD. Karena respon bacaan TLD itu sendiri bergantung pada besar energi yang diterima. Ketidakpastian yang berkaitan dengan pengontrolan ini adalah pengaturan pewaktu (*timer*) yang dipengaturkan melalui ruang kontrol generator sinar x. Hal ini akan mempengaruhi seberapa banyak foton yang dapat diserap oleh TLD dalam rentang waktu pengukuran yang telah ditetapkan.

Detektor Unfors Xi yang digunakan memiliki ketidakpastian pengukuran sebesar 2%. Nilai ini diperoleh dari sertifikasi kalibrasi. Sensitivitas *reader* sangat dipengaruhi oleh kinerja PMT, kestabilan kerjanya berdasarkan sertifikasi yang dilakukan oleh perusahaan yang memproduksinya adalah sebesar 1 %, sedangkan untuk reproduksibilitas suhu *reader* 0.025%.

Dari hasil pengamatan yang dilakukan pada *fading*, pengaruh temperatur lingkungan pada saat penyimpan TLD setelah diradiasi sangat mempengaruhi hasil bacaan TLD. Dari hasil pengukuran yang dilakukan setiap hari setelah TLD

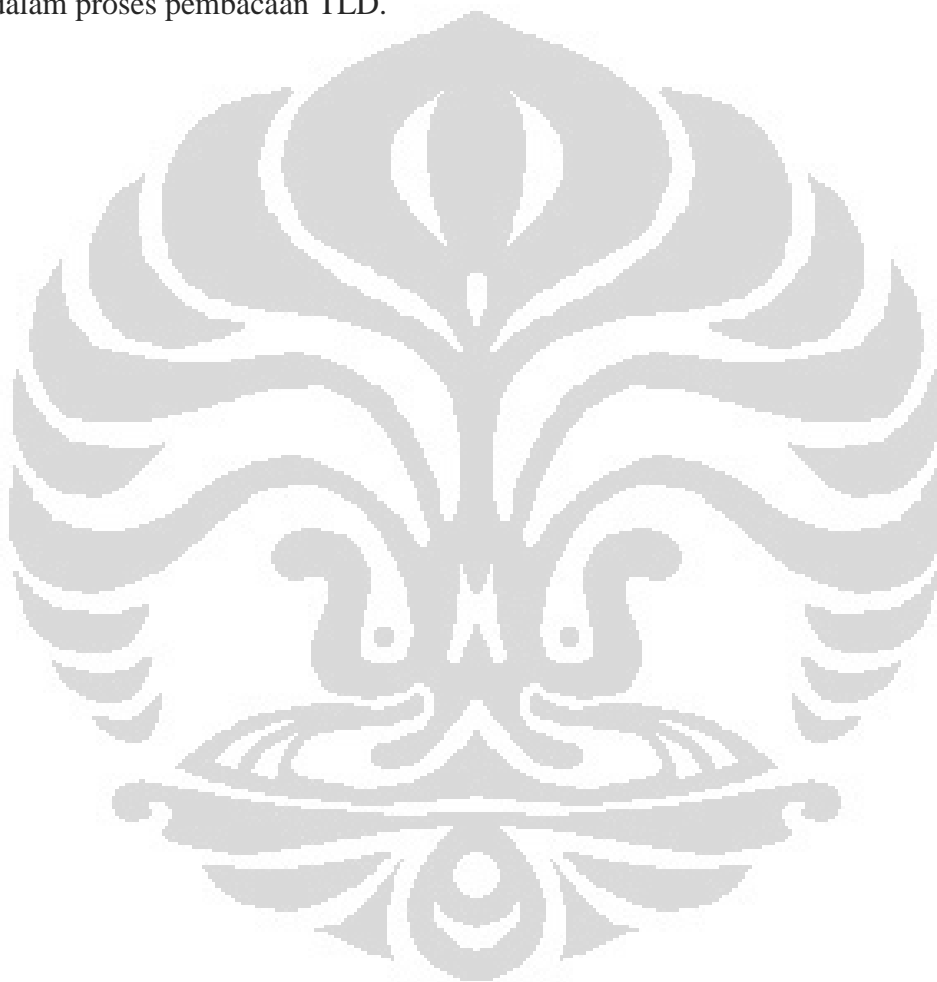
diradiasi selama 8 hari respon bacaan TLD cenderung berkurang. Perbedaan respon ini disebabkan karena puncak yang berada pada temperatur rendah intensitasnya akan berkurang secara alami. Agar memberikan respon bacaan yang optimum maka TLD sebaiknya dibaca pada hari ke-7 setelah penyinaran. *Fading* yang terjadi pada hari ke-7 tersebut sudah mulai konstan. Hal yang paling penting dalam hal ini adalah kondisi pada penyimpanan TLD setelah penyinaran. Jika suhu penyimpanan TLD berbeda untuk setiap harinya maka *fading* yang terjadi tentunya juga berbeda. Pengontrolan suhu penyimpanan ini bertujuan agar setiap harinya TLD akan mengalami *fading* yang sama. Sedangkan untuk menghindari *optical fading* dari paparan sinar UV maka tempat untuk menyimpannya bisa ditutupi agar kedap cahaya.

Pemberian besar dosis yang bervariasi tidak mempengaruhi puncak dosimetrik TLD. Kurva pancar untuk setiap variasi besar dosis yang diberikan tidak mengalami perubahan. Perbedaannya yang dapat diamati adalah intensitas sinyal TL yang dipancarkan, untuk dosis yang lebih tinggi tentunya lebih besar jika dibandingkan dengan dosis yang lebih rendah.

Pengaturan TTP yang berbeda akan memberikan hasil bacaan respon TLD yang berbeda juga. Jika dalam perlakuan awal menggunakan untuk satu pengaturan TTP maka untuk selanjutnya tetap menggunakan pengaturan TTP yang sama. Artinya tanpa melihat dari segi dosis yang diberikan, misalnya untuk aplikasi TLD pada dosis tinggi, maka sesuai dengan yang direkomendasikan pada saat proses pembacaan sebaiknya menggunakan pengaturan TTP yang ditujukan untuk dosis tinggi. Tetapi pada saat proses pembacaan TLD menggunakan pengaturan TTP yang diperuntukkan aplikasi TLD pada dosis rendah. Tindakan yang perlu dilakukan disini adalah menjaga kekonsistenan dalam menggunakan pengaturan TTP yang digunakan pada saat proses awal dilakukan. Karena pengaturan TTP akan mempengaruhi faktor kalibrasi yang telah diperoleh sebelumnya. Penggantian pengaturan TTP ditengah proses yang dilakukan sangat tidak diajarkan. Dari segi hasil bacaan jelas akan mendapatkan hasil bacaan respon yang berbeda. Walaupun perubahan pengaturan TTP pada saat proses pembacaan TLD tidak akan merubah bentuk kurva pancar yang dihasilkan. Hal yang perlu sebaiknya dilakukan adalah pemilihan pengaturan TTP yang sesuai

dengan aplikasi TLD untuk masing-masing jenis dosis yang digunakan, dosis tinggi dan dosis rendah. Pengaturan TTP yang sesuai akan memberikan hasil yang lebih baik.

Dari keseluruhan tindakan yang dilakukan dalam proses pembacaan TLD agar diperoleh keakurasian yang lebih baik. Semua parameter yang mempengaruhi harus menjadi perhatian. Hal yang paling utama yang perlu diperhatikan adalah kekonsistenan dalam setiap perlakuan yang diberlakukan dalam proses pembacaan TLD.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

- Peningkatkan akurasi proses pembacaan TLD dapat dilakukan dengan memperhatikan beberapa hal sebagai berikut :
 - Pemilihan pengaturan TTP yang sesuai dengan besar dosis yang digunakan.
 - Pengelompokkan TLD dalam rentang $\pm 3\%$ dari rata-rata respon.
 - Semua TLD mendapatkan perlakuan yang sama, seperti proses *annealing* maupun pada saat penyinaran dan proses penyimpanan.
 - Konsistensi dari parameter pengukuran, seperti pengaturan TTP (jika pada pengelompokkan menggunakan pengaturan TTP untuk dosis rendah maka untuk selanjutnya menggunakan pengaturan yang sama, Pada pengelompokkan TLD dibaca setelah 24 jam penyinaran.
- Faktor kalibrasi pada tegangan tabung sinar x 40, 50, 60 dan 70 kV kecenderungannya menurun dan kemudian naik lagi ketika tegangan tabung juga dinaikkan.
- Persamaan *fading* $y = 122.962 x^{-0.049}$ dengan pengurangan intensitas sebesar 11.272 pada hari kedelapan dan dengan ekstrapolasi menggunakan persamaan *fading* diperoleh penurunan sebesar 7% selama 365 hari.
- Akurasi proses pembacaan detektor TL dipengaruhi oleh ketidakpastian sistematis yang dapat dikontrol dan ketidakpastian acak rata-rata sebesar 5.77%.
- Respon dosimeter TL bergantung pada energi sinar x. Oleh karena itu faktor kalibrasi juga dipengaruhi oleh besar tegangan tabung sinar x yang diberikan.
- Perbedaan pengaturan TTP memberikan perbedaan rasion bacaan dosis rendah terhadap dosis tinggi yang berdampak pada nilai faktor kalibrasi TLD berubah sebesar 1.05, 1.03, dan 1.05 berturut-turut dengan tegangan tabung 40, 70 dan 150 kV, sedangkan untuk cobalt 60 dengan variasi dosis 2, 1, dan 0.1 Gy berubah sebesar 1.05, 1.04, dan 1.00.

5.2 Saran

- Untuk tujuan peningkatan akurasi proses pembacaan TLD semua parameter yang berkaitan dengan proses bacaan TLD turut diperhitungkan karena parameter-parameter itu sendiri memiliki ketidakpastian.
- Dalam proses kalibrasi dosimeter sangat penting untuk mempertahankan dan menjaga konsistensi setiap parameter agar reproduksibilitas dalam pengukur berjalan dengan baik.
- Untuk lebih meningkatkan akurasi pengukuran sebaiknya ketidakpastian tipe A sebaiknya menggunakan data pengukuran.



DAFTAR ACUAN

- Andika, Rahmat. *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: 2010
- Aschan, Carita. *Applicability of Thermoluminescent Dosimeters in Sinar x Organ Dose Determination and in the Dosimetry of Systemic and Boron Neutron Capture Radiotherapy*. Department of Physics, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki:1999
- Attix, F.H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York: John Wiley & Sons:1986
- Bos, A.J.J. *High Sensitivity Thermoluminescence Dosimetry*. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 184, 3-28, 2001
- González, P.R., C. Furetta, J. Azorín. *Comparison of the TL Responses of Two Different Preparations of LiF:Mg,Cu,P Irradiated by Photons of Various Energies*. Applied Radiation and Isotopes 65, 341 – 344, 2007
- Shani, Gad. *Radiation Dosimetry : Instrumentation and Methods-2nd ed*. CRC Press LLC : 2001
- ISO “*Guidelines to the Expression of Uncertainty in the Measurement*”, 1995
- Izwska, J., Novotny J., Van Dam, J., Dutreix, A and van der Schueren, E. *the Influence of the IAEA Standar Holder on Dose Evaluated from TLD Samples* Phys. Med. Biol. 41, 465-473,1996
- Kirby T.H., Hansson W.F., Johnston D.A., *Uncertainty Analysis of Absorbed Dose Calculation from Thermoluminescence Dosimeters*, Med. Phys. 19, 1427-1433, 1992
- Horowitz, Y.S., 1984. *Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry*. Boca Raton, CRC Press, FL.
- Mc Keever S. W. S, *Thermoluminescence of solids*. University Press,New York :1985
- Mc Kinlay A. F, *Thermoluminescent Dosimetry*. Medical Physics Handbook N°5,Adam Hilger, Ltd : 1981

- Moscovitch, M., Y.S. Horowitz. Thermoluminescent Materials for Medical Applications: LiF:Mg,Ti and LiF:Mg,Cu,P. *Radiation Measurements* 41, S71 – S77, 2007
- Van Dam J. and G. Marinello. *Methods For In-vivo Dosimetry in External Radiotherapy*. ESTRO: 2006
- Oktavina, W Dwi. *Koefisien Backscatter Factor Sinar-X Diagnostik Dalam Rentang RQR (Radiation Qualities in Radiodiagnostic) Pada ISO Water Slab Phantom*. Depok : Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia : 2011
- Onoriode, Akpochafor Michael. *Thermoluminescent Dosimetry in Clinical Kilovoltage Beams*. A research report submitted to the Faculty of Science, University of the Witwatersrand. Johannesburg: 2010

