



**KAJIAN DAN ANALISIS PELAT TIMBAL (Pb) BEKAS  
TUTUP INSTALASI LISTRIK PADA ATAP RUMAH  
SEBAGAI BAHAN PROTEKSI RADIASI SINAR-X**

Skripsi  
disusun sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains  
Program Studi Fisika

oleh  
**Itsna Nuzula Rahma**  
4211412018

**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**  
**2016**

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.



Semarang, 15 Agustus 2016



*[Handwritten signature]*

Itsna Nuzula Kahma

4211412018

**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Kajian dan Analisis Pelat Timbal (Pb) Bekas Tutup Instalasi Listrik Pada  
Atap Rumah Sebagai Bahan Proteksi Radiasi Sinar-X

disusun oleh

Itsna Nuzula Rahma  
4211412018

telah dipertahankan dihadapan sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Fisika FMIPA  
Universitas Negeri Semarang pada tanggal 15 Agustus 2016.



Panitia  
Ketua  
Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si, Akt  
NIP. 196412231988031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si  
NIP. 196807141996031005

Ketua Penguji

Dra. Dwi Yulianti, M.Si  
NIP. 196007221984032001

Anggota Penguji/  
Pembimbing I

Drs. Mosik, M.S.  
NIP. 195807241983031001

Anggota Penguji/  
Pembimbing II

Prof. Dr. Susilo, M.S.  
NIP. 195208011976031006

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto:

- "Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan."(QS.Al-Mujadalah:11)
- "Menjadi baik itu mudah dengan hanya diam maka yang tampak adalah kebaikan, yang sulit adalah menjadi bermanfaat karena itu butuh perjuangan."  
(KH. Sahal Mahfudh)

Atas anugrah Allah SWT, skripsi ini saya persembahkan untuk

1. Bapak dan ibu yang telah menyayangi, memotivasi, dan mendo'akan saya.
2. Adik-adikku
3. Bapak-Ibu guru dan Bapak-Ibu dosen
4. Sahabat-sahabatku
5. Teman-temanku
6. Almamaterku

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Kajian dan Analisis Pelat Timbal (Pb) Bekas Tutup Instalasi Listrik Pada Atap Rumah Sebagai Bahan Proteksi Radiasi Sinar-X”**. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya partisipasi dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum., rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si,Akt., dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.
4. Drs. Mosik, M.S., Pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
5. Prof. Dr. Susilo, M.S., Pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
6. Dra. Dwi Yulianti, M.Si, Penguji yang telah menguji seperti dosen pembimbing, banyak memberikan pengetahuan dan saran yang membangun.
7. Dr. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Kepala Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang.

8. Roudhotul Muttaqin S.Si, Wasi Sakti Wiwit P, S.Pd, dan Natalia S.Pd teknisi Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang yang telah membantu dalam penelitian.
9. Rudi Setiawan (Undip) membantu dalam pembuatan program penelitian.
10. Bapak, Ibu tercinta dan terkasih yang merawat, membesarkan, dan mendidik dengan penuh kasih sayang.
11. Kedua adikku Zakky dan Kurnia yang selalu menyemangatiku.
12. Sahabatku Mirna Ulfa Ni'mah yang tak lelah memberi motivasi dan dukungan untukku.
13. Sahabat-sahabat fisika Timel dan Yuii yang telah membantu dalam penelitian dan tak lelah memberi semangat untukku.
14. Teman-teman Fisika Medik yang selalu memberi semangat dan membantu selama penelitian.
15. Teman-teman Fisika angkatan 2012 yang selalu menjadi teman diskusi
16. Semua pihak yang telah membantu selama penyusunan skripsi ini.

Saya menyadari keterbatasan kemampuan yang dimiliki sehingga skripsi ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat diharapkan untuk kesempurnaan penulisan selanjutnya. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca. Amin.

Penulis

## ABSTRAK

**Rahma, I. N.** 2016. Kajian dan Analisis Pelat Timbal (Pb) Bekas Tutup Instalasi Listrik Pada Atap Rumah Sebagai Bahan Proteksi Radiasi Sinar-X. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Dosen Pembimbing: Drs. Mosik, M.S., Prof. Dr. Susilo, M.S.

**Kata Kunci:** Timbal (Pb), Proteksi radiasi, Sinar-X

Sinar-X dalam dunia medis biasa digunakan untuk media diagnosis melalui bentuk potret anatomi tubuh yang ditampilkan dalam film radiografi. Radiasi sinar-X selain bermanfaat juga mempunyai potensi bahaya bagi keselamatan manusia. Perisai radiasi perlu digunakan di medan radiasi untuk melindungi agar pekerja radiasi maupun pasien tidak menerima paparan radiasi diatas batas dosis yang ditentukan. Material perisai sinar-X yang biasa digunakan adalah timbal (Pb) karena logam timbal dapat menyerap energi radiasi sinar-X. Timbal merupakan produk stabil dari deret radioaktif alam yang memiliki nomor massa tinggi dan kerapatan massa yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pelat timbal bekas terhadap laju dosis radiasi sinar-X, mengetahui hubungan antara tegangan sinar-X dengan laju dosis radiasi dan mengetahui hasil citra radiograf dari *stepwedge* timbal. Alat yang digunakan dalam penelitian yaitu pesawat sinar-X Mednif SF-100BY, *surveymeter* analog, penggaris, jangka sorong, apron, dan sistem radiografi digital modifikasi yang ada di Laboratorium Fisika Medik Universitas Negeri Semarang, sedangkan bahan penelitian yang digunakan yaitu pelat timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah dengan berbagai ketebalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju dosis radiasi dapat berkurang dengan penambahan ketebalan pelat timbal. Besar laju dosis radiasi berbanding lurus dengan besar tegangan sinar-X. Semakin besar tegangan sinar-X yang digunakan, semakin besar pula nilai laju dosis yang terukur. Pada penelitian dengan sistem *Digital Radiography* (DR) modifikasi menunjukkan bahwa nilai *grey level* berkurang terhadap bertambahnya ketebalan timbal. Berkurangnya nilai GL menunjukkan terdapat perbedaan tingkat keabuan setiap step pada *stepwedge* timbal (Pb). Ketebalan dan kerapatan suatu unsur bahan juga berpengaruh terhadap penyerapan sinar-X. Bahan yang tebal akan lebih banyak menyerap sinar-X dibanding dengan bahan yang tipis pada energi sinar-X sama.

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERNYATAAN</b> .....	ii
<b>PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>MOTTO DAN PERSEMBAHAN</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>BAB</b>	
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan Skripsi .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 Deret Radioaktif .....	6
2.2 Timbal (Pb).....	9
2.3 Sinar-X .....	11
2.3.1 Sinar-X Karakteristik .....	12
2.3.2 Sinar-X <i>Bremsstrahlung</i> .....	13
2.4 Interaksi Sinar-X Dengan Materi .....	14
2.4.1 Efek Fotolistrik .....	14

2.4.2 Hamburan Compton .....	15
2.4.3 Produksi Pasangan .....	16
2.5 Koefisien Atenuasi .....	16
2.6 Proteksi Radiasi .....	17
2.6.1 Efek Radiasi Pada Tubuh Manusia .....	18
2.6.2 Proteksi Radiasi Eksternal .....	18
2.7 <i>Surveymeter</i> .....	24
2.8 <i>Digital Radiography (DR)</i> .....	25
<b>3. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>27</b>
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	27
3.2 Alat dan Bahan .....	27
3.3 Metode Penelitian .....	27
3.4 Tahapan Penelitian .....	29
3.4.1 Pengukuran Laju Dosis Radiasi .....	30
3.4.2 Analisis Citra Radiograf .....	34
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>36</b>
4.1 Analisis Laju Dosis Radiasi .....	36
4.2 Analisis Citra Dengan <i>Software</i> Matlab .....	41
<b>5. PENUTUP</b> .....	<b>47</b>
5.1 Kesimpulan .....	47
5.2 Saran .....	48
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>49</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>53</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Rantai peluruhan utama dari empat deret radioaktif .....	7
2.2. Tabung pesawat sinar-X .....	11
2.3. Sinar-X karakteristik .....	12
2.4. Sinar-X Bremsstrahlung .....	13
2.5. Efek Fotolistrik .....	14
2.6. Skema Hamburan Compton .....	15
2.7. Proses Produksi Pasangan .....	16
2.8. Pengurangan Intensitas Radiasi Foton .....	17
2.9. Faktor Pelemahan untuk Penahan Radiasi Timbal .....	22
2.10. Faktor Pelemahan untuk Penahan Radiasi Beton .....	23
2.11. <i>Surveymeter</i> analog .....	25
2.12. Sistem Digital Radiography (DR) .....	26
3.1. Skema Penelitian .....	29
3.2. Skema pengujian daya tembus timbal .....	31
3.3. Algoritma Penghitungan <i>Grey Level</i> Citra Dengan GUI .....	33
3.4. Tampilan GUI Matlab .....	34
4.1. Sampel penelitian (pelat timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah) .....	36
4.2. Grafik Hubungan Antara Tebal Timbal (Pb) Terhadap Laju Dosis Radiasi ( $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ ) Dengan Variasi Tegangan Sinar-X (kV) .....	38
4.3. <i>Stepwedge</i> timbal (Pb) dan Hasil Citra Radiograf .....	42
4.5. Grafik Hubungan Antara Tebal Timbal Bekas Terhadap $\text{Log} \frac{GL_0}{GL_x}$ .....	45

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Empat deret radioaktif .....	6
2.2. Peluruhan radioaktif pada deret Uranium ( $^{238}_{92}U$ ) .....	8
2.3. Transmisi efektif (%) dari timbal murni .....	10
4.1. Nilai <i>Grey Level</i> Citra <i>Stepwedge</i> Timbal .....	43



**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Data pengukuran laju dosis radiasi .....	53
2. Analisis <i>greylevel.citra</i> .....	54
3. M-file analisis <i>greylevel</i> .....	55
4. Dokumentasi penelitian .....	68
5. Surat Keputusan Penetapan Dosen Pembimbing .....	71
6. Surat Izin Penelitian .....	72



**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Logam timbal merupakan produk akhir dari deret radioaktif  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$ , dan  $^{232}_{90}\text{Th}$  yang merupakan inti stabil (Beiser, 1986: 407). Inti berat seperti timbal akan lebih stabil jika jumlah neutron melebihi jumlah proton (Serway, 2005: 468). Tiga isotop timbal  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{207}_{82}\text{Pb}$ , dan  $^{208}_{82}\text{Pb}$ , unsur Pb memiliki nomor atom Z atau jumlah proton sebesar 82 dan dari ketiga isotop timbal diatas secara berturut-turut memiliki jumlah neutron ( $N = A - Z$ ) sebesar 124, 125, dan 126 dan merupakan isotop stabil. Timbal (Pb) jika berinteraksi dengan radiasi  $\alpha$ , radiasi  $\beta$ , radiasi  $\gamma$  atau sinar-X tidak dapat meluruh menjadi unsur lain. Namun energi dari radiasi tersebut akan diserap oleh timbal karena memiliki nomor massa yang tinggi sehingga kerapatan massa timbal juga tinggi.

Sinar-X merupakan salah satu sumber radiasi yang digunakan dalam bidang medis untuk mendiagnosis adanya suatu penyakit dalam bentuk potret anatomi tubuh yang ditampilkan dalam film radiografi. Penggunaan sinar-X harus memperhatikan aspek keselamatan kerja radiasi. Pemerintah telah menerbitkan Peraturan Pemerintah nomor 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan sumber radioaktif, Surat Keputusan Kepala Bapeten nomor 01/Ka-Bapeten/V-99 tentang Kesehatan terhadap radiasi pengion disebut keselamatan radiasi, yang memuat nilai

batas dosis yaitu pekerja radiasi  $< 50$  mSv/tahun dan masyarakat umum  $< 5$  mSv/tahun (Maryanto, 2008).

Perisai radiasi harus mempunyai dua sifat sebagai karakteristik pokok. Diantaranya, pertama mampu menyerap radiasi sinar-X dan radiasi lain yang mempunyai karakteristik sama dengan sinar-X, dan syarat kedua adalah bahan perisai radiasi yang akan dibuat untuk para pekerja yang berada di medan radiasi, maka persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah perisai tersebut tidak terlalu tebal (Prayitno, 2009). Tebal dinding penahan radiasi primer adalah dinding dari bata plesteran dengan tebal 25 cm atau beton ( $\rho = 2,2 \text{ gr/cm}^3$ ) setebal 15 cm yang setara dengan Pb 2 mm (Bapeten, 2011). Logam timbal murni mempunyai kerapatan massa sebesar  $11,34 \text{ g/cm}^3$  sehingga dengan timbal 2 mm dapat menyerap seluruh energi sinar-X pada energi sebesar 100 KeV.

Dewasa ini logam timbal banyak bermanfaat dalam kehidupan. Salah satu manfaat timbal sebagai penutup instalasi listrik pada atap rumah. Seiring berkembangnya teknologi, instalasi listrik di atap rumah sudah tidak menggunakan timbal sebagai penutupnya. Sehingga pelat timbal bekas tutup instalasi listrik yang sudah tidak terpakai pasti menjadi limbah. Timbal merupakan logam yang tahan korosi. Manfaat lain dari pelat timbal yaitu sebagai bahan perisai dari radiasi sinar-X. Ruangan pesawat sinar-X menggunakan pelat timbal sebagai bahan proteksi radiasinya. Untuk itu perlu adanya pengujian terhadap pelat timbal bekas sebagai bahan proteksi radiasi sinar-X, supaya limbah pelat timbal bekas dapat berkurang.

Penelitian ini dilakukan pengujian terhadap pelat timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah sebagai bahan proteksi radiasi terhadap sinar-X. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketebalan timbal terhadap laju dosis, pengaruh tegangan sinar-X terhadap laju dosis radiasi dan pengujian citra radiograf dari *stepwedge* timbal, sehingga dapat diketahui timbal bekas layak digunakan sebagai bahan proteksi radiasi sinar-X.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh ketebalan pelat timbal bekas terhadap laju dosis radiasi sinar-X?
2. Bagaimana pengaruh besar tegangan sinar-X terhadap daya tembus sinar-X?
3. Bagaimana hasil citra radiograf dari *stepwedge* timbal ?

## 1.3. Batasan Masalah

Timbal (Pb) yang digunakan adalah pelat timbal (Pb) bekas pemakaian PLN sebagai tutup instalasi listrik pada atap rumah. Pengujian yang dilakukan mengukur laju dosis radiasi sinar-X dengan menggunakan *surveymeter analog* dan mengetahui hasil citra radiograf dari *stepwedge* pelat timbal bekas dengan menggunakan *Digital Radiography* (DR) modifikasi yang ada di Laboratorium Fisika Medik UNNES.

#### 1.4. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh ketebalan pelat timbal bekas terhadap laju dosis radiasi sinar-X.
2. Mengetahui pengaruh besar tegangan sinar-X terhadap daya tembus sinar-X.
3. Mengetahui hasil citra radiograf dari *stepwedge* timbal.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah dapat dijadikan sumber acuan bagi penelitian lebih lanjut mengenai pelat timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah dengan mengetahui pengaruh ketebalan pelat timbal terhadap laju dosis radiasi sinar-X, pengaruh besar tegangan terhadap daya tembus sinar-X dan mengetahui hasil citra radiograf dari *stepwedge* timbal bekas.

#### 1.6. Sistematika Penulisan Skripsi

Adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

Bagian pendahuluan, terdiri dari halaman judul, persetujuan pembimbing, halaman pengesahan, pernyataan, motto dan persembahan, kata pengantar, sari (abstrak), daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran.

Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang meliputi:

Bab 1 Pendahuluan, berisi latar belakang, rumusan permasalahan, batasan permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika skripsi.

Bab 2 Landasan teori, berisi teori-teori pendukung penelitian.

Bab 3 Metodologi Penelitian, berisi tempat pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian.

Bab 4 Hasil Penelitian dan Pembahasan, dalam bab ini dibahas tentang hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan.

Bab 5. Penutup, bab ini berisi tentang kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang berkaitan dengan hasil penelitian.

Bagian akhir skripsi memuat tentang daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dari penulisan skripsi dan lampiran-lampiran.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Deret Radioaktif

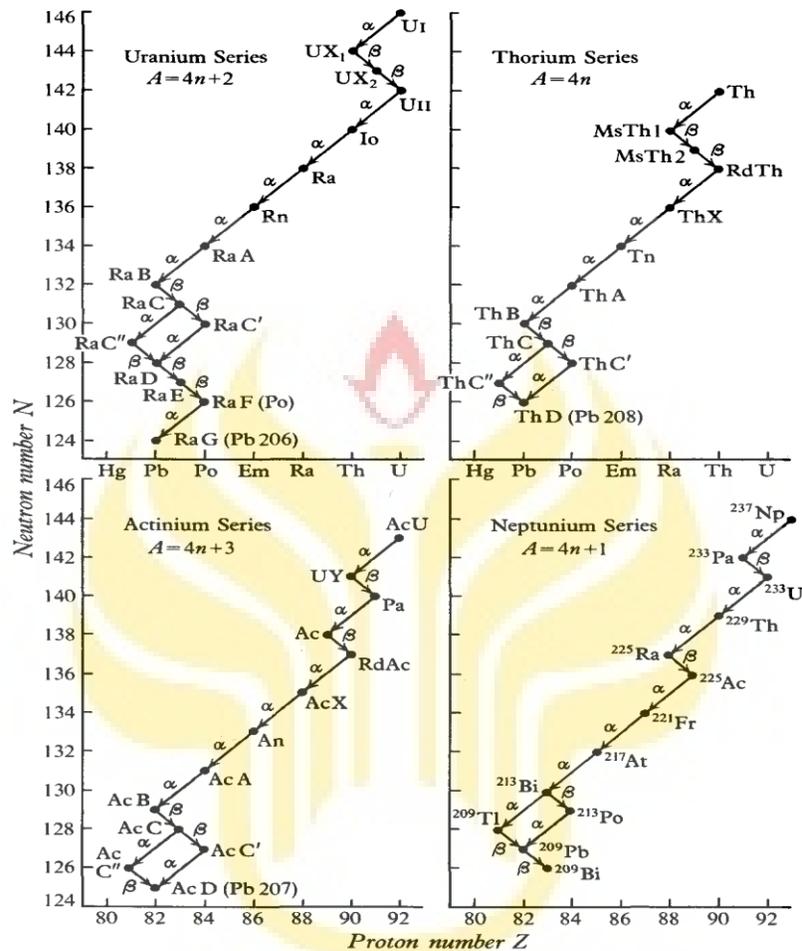
Inti radioaktif umumnya diklasifikasikan menjadi dua kelompok: (1) deret radioaktivitas alam, dan (2) deret radioaktivitas buatan (Serway, 2005: 493). Deret radioaktivitas alam merupakan rangkaian peluruhan radioaktif yang terjadi di alam, tanpa adanya reaktor nuklir. Sedangkan deret radioaktivitas buatan merupakan peluruhan radioaktif yang dibuat dengan menggunakan reaktor nuklir. Terdapat tiga deret inti radioaktif alami dan satu inti radioaktivitas buatan seperti yang terlihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Empat deret radioaktif (Beiser, 1986: 406)

Nomor Massa	Deret	Induk	Umur Paruh (tahun)	Produk Stabil Akhir
4n	Thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1.39 \times 10^{10}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
4n+1	Neptunium	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2.25 \times 10^6$	$^{209}_{83}\text{Bi}$
4n+2	Uranium	$^{238}_{92}\text{U}$	$4.51 \times 10^9$	$^{207}_{82}\text{Pb}$
4n+3	Aktinium	$^{235}_{92}\text{U}$	$7.07 \times 10^8$	$^{206}_{82}\text{Pb}$

Setiap deret radioaktif terdiri dari urutan produk isotop anak yang semuanya dapat diturunkan dari inti induk tunggal. Tiga seri alam mulai dengan  $^{238}_{92}\text{U}$  (Uranium),  $^{235}_{92}\text{U}$  (Aktinium), dan  $^{232}_{90}\text{Th}$  (Thorium), dan sesuai produk akhir yang stabil tiga isotop timbal:  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{207}_{82}\text{Pb}$ , dan  $^{208}_{82}\text{Pb}$ .

Peluruhan  $\alpha$  dan  $\beta$  biasanya disertai dengan emisi sinar  $\gamma$ . Nilai-nilai A dari anggota rangkaian peluruhan ini berbeda berdasarkan kelipatan 4 dan memiliki empat kemungkinan peluruhan berantai, dengan A nilai-nilai yang dapat dinyatakan sebagai  $4n$ ,  $4n + 1$ ,  $4n + 2$ , dan  $4n + 3$ , dimana  $n$  adalah bilangan bulat (Krane, 2011: 399). Gambar 2.1 berikut menunjukkan peluruhan berantai yang terjadi pada empat deret radioaktif.



**Gambar 2.1.** Rantai peluruhan utama dari empat deret radioaktif (Burcham, 1973:33)

Peluruhan berantai unsur radioaktif meluruh melalui peluruhan  $\alpha$ , peluruhan  $\beta$  dan peluruhan  $\gamma$  sehingga mendapatkan inti-anak yang stabil sebagai produk akhirnya. Deret radioaktif alam meluruh dalam kisaran waktu  $10^{10}$  tahun sedangkan deret radioaktif buatan meluruh dalam waktu sekitar  $10^6$  tahun. Deret uranium ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) merupakan salah satu deret radioaktif alam dan berikut merupakan tahapan peluruhan radioaktif dari inti induk uranium  $^{238}_{92}\text{U}$  dan berakhir pada inti anak timbal  $^{206}_{82}\text{Pb}$ .

**Tabel 2.2.** Peluruhan radioaktif pada deret Uranium ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) (Baratha, 1991)

Simbol	Radiasi	Waktu paruh
$^{238}\text{U}$	A	4,468 milyar tahun
$^{234}\text{Th}$	$\beta, \gamma$	24,1 hari
$^{234}\text{Pa}$	B	1,18 menit
$^{234}\text{U}$	A	248.000 tahun
$^{230}\text{Th}$	A	75.200 tahun
$^{226}\text{Ra}$	A	1602 tahun
$^{222}\text{Rn}$	A	3,825 hari
$^{218}\text{Po}$	A	3,05 menit
$^{214}\text{Pb}$	$\beta, \gamma$	26,8 menit
$^{214}\text{Bi}$	$\beta, \gamma$	19,7 menit
$^{214}\text{Po}$	A	1,64/10.000 detik
$^{210}\text{Pb}$	B	22 tahun
$^{210}\text{Bi}$	B	5,02 hari
$^{210}\text{Po}$	A	138,3 hari
$^{206}\text{Pb}$		Stabil

Tabel 2.2 diatas terlihat unsur uranium ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) meluruh hingga menjadi isotop  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . Zat radioaktif uranium merupakan inti yang tidak stabil dan berdisintegrasi dengan memancarkan 3 macam sinar yaitu  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  (Gabriel, 1996: 290). Uranium mengalami banyak peluruhan untuk mencapai keadaan yang stabil pada akhir peluruhannya. Hal ini terlihat peluruhan masih berlanjut ketika mencapai isotop  $^{214}_{82}\text{Pb}$  dan  $^{210}_{82}\text{Pb}$ , karena pada isotop timbal tersebut timbal belum mencapai

kestabilan dan peluruhan masih terjadi hingga timbal mencapai stabil pada isotop  $^{206}_{82}\text{Pb}$ .

## 2.2. Timbal (Pb)

Timbal (Pb) termasuk dalam kelompok logam berat golongan IVA dalam sistem periodik unsur. Timbal merupakan logam berat dengan tingkat kerapatan tinggi yang memiliki nomor atom dan nomor massa tinggi. Dengan tingkat kerapatan yang tinggi tersebut jangkauan elektron dalam timbal akan sangat pendek (Akhadi, 1996: 75). Timbal yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat timbal bekas dengan berbagai variasi ketebalan.

Pengurangan energi sinar- $\gamma$  atau sinar-X oleh materi yang dilaluinya terjadi terutama melalui proses efek fotolistrik, efek Compton, dan produksi pasangan. Karena kebolehdjian interaksi lebih besar pada materi dengan nomor atom tinggi, maka materi yang cocok sebagai perisai sinar- $\gamma$  atau sinar-X adalah timbal dan besi. Karena dalam rentang radiasi energi menengah (0,5 - 0,75 MeV), kerapatan material perisai lebih penting, sedangkan untuk radiasi energi tinggi dan energi rendah material perisai dengan nomor atom tinggi lebih efektif (Ariyanto, 1998). Menurut Kristiyanti (2005) logam timbal memiliki koefisien serap linier sebesar 0,495 sehingga timbal dapat menyerap seluruh dosis radiasi sinar-X sebesar 100 kVp dengan ketebalan 2 mm. Logam timbal dapat dijadikan bahan proteksi radiasi sinar-X maupun sinar- $\gamma$  dengan syarat berkas sinar yang keluar dari sumber radiasi harus

terkolimasi (Atmojo, 2003). Tabel 2.3 berikut merupakan transmisi efektif dari timbal alam dengan ketebalan yang bervariasi.

**Tabel 2.3.** Transmisi efektif (%) dari timbal murni (McCaffrey, 2007).

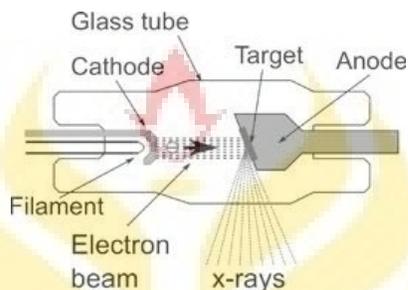
Tebal Pb (mm)	Tegangan yang digunakan (kVp)			
	60	80	100	120
0,25	4,28	11,95	16,73	20,16
0,5	0,42	2,55	4,96	6,31
1,0	0,01	0,27	0,86	1,09
2,0	0,00	0,01	0,05	0,06

Laju dosis radiasi dengan perisai timbal berbanding terbalik dengan ketebalan timbal. Semakin tebal bahan penyerap yang digunakan maka semakin kecil laju dosis yang terukur oleh *surveymeter*. Tabel 2.3 menunjukkan dengan ketebalan timbal 0,25 mm dan 0,5 mm laju dosisnya masih dalam orde satuan hingga puluhan. Sedangkan pada ketebalan timbal 1 mm laju dosis yang terukur sedikit. Pada ketebalan timbal 2 mm laju dosis yang terukur sudah kecil, sehingga timbal dengan ketebalan 2 mm dapat digunakan sebagai bahan perisai radiasi sinar-X dengan tegangan 100 kVp.

### 2.3. Sinar-X

Sinar-X ditemukan pada tanggal 8 November 1895, Wilhelm Conrad Roentgen seorang fisikawan dan rektor Universitas Wuerzburg di Jerman melakukan penelitian tabung sinar katoda (Rudi *et al*, 2013). Sinar-X merupakan pancaran gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang sangat pendek. Sinar-X bermanfaat di dalam dunia medis karena sifatnya dapat menembus bahan, dengan

daya tembus sangat besar. Jika tegangan sinar-X yang digunakan tinggi, maka daya tembusnya juga tinggi. Sinar-X dengan energi rendah umumnya digunakan sebagai radiodiagnostik, sedangkan sinar-X dengan energi tinggi umumnya dimanfaatkan untuk radioterapi (Retno, 2014). Gambar 2.2 merupakan diagram tabung sinar-X.



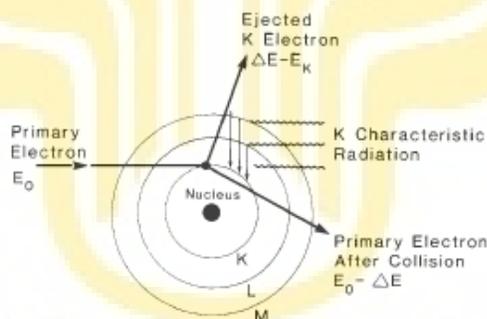
**Gambar 2.2.** Tabung pesawat sinar-X (Haidekker, 2013)

Tabung sinar-X adalah suatu alat untuk menghasilkan sinar-X (Trikasjono, 2009). Di dalam tabung sinar-X yang terbuat dari bahan gelas terdapat filamen yang bertindak sebagai kutub katoda, dan sasaran (tungsten) yang bertindak sebagai kutub anoda. Tabung sinar-X dibuat hampa udara agar elektron yang berasal dari filamen tidak terhalang oleh molekul udara menuju ke anoda. Filamen yang dipanasi arus listrik bertegangan rendah menjadi sumber elektron. Elektron yang dibebaskan oleh filamen tertarik ke anoda karena adanya beda potensial yang besar atau tegangan tinggi antara katoda dan anoda, elektron ini menabrak bahan sasaran yang umumnya bernomor atom dan bertitik cair tinggi (Wiriyosimin, 1995: 2). Akibat dari elektron yang menumbuk target, 99% energinya berubah menjadi panas dan 1% energinya berubah menjadi sinar-X yang dikeluarkan melalui celah tabung sinar-X.

Berdasarkan proses terjadinya, sinar-X dibagi menjadi dua yaitu sinar-X karakteristik dan sinar-X *bremsstrahlung*.

### 2.3.1. Sinar-X Karakteristik

Sinar-X karakteristik dihasilkan ketika elektron berinteraksi dengan elektron pada atom target. Elektron pada atom target akan terionisasi. Kekosongan pada kulit elektron tersebut akan diisi oleh elektron pada kulit luar. Transisi elektron dari kulit terluar menuju kekosongan pada kulit lebih dalam akan mengemisikan foton yang disebut sinar-X karakteristik (Andika, 2010). Sinar-X karakteristik memiliki spektrum energi diskrit. Gambar 2.3 menunjukkan terjadinya sinar-X karakteristik.

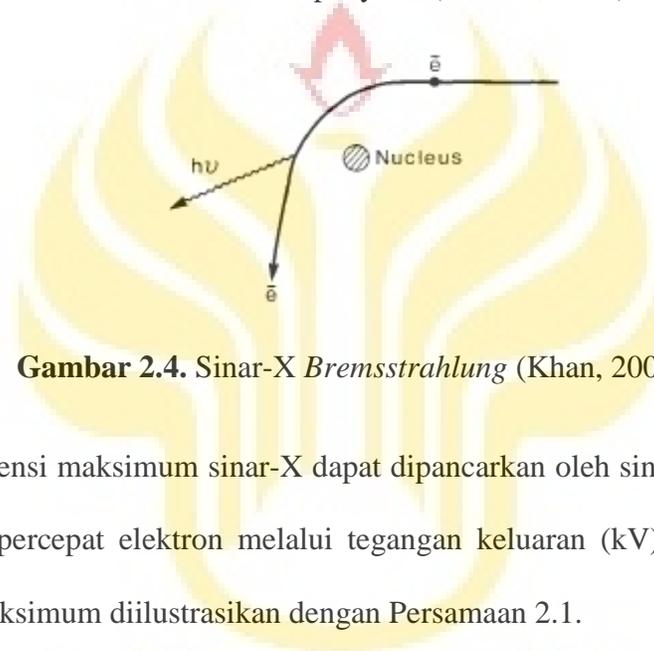


Gambar 2.3. Sinar-X karakteristik (Khan, 2003: 35)

### 2.3.2. Sinar-X *Bremsstrahlung*

Saat berkas elektron menabrak target, sebagian besar energi elektron tersebut hilang dalam bentuk panas, sebagian energi lainnya hilang untuk memproduksi sinar-X, namun ada pula kemungkinannya semua energi kinetik elektron tersebut diubah menjadi foton sinar-X, yang disebut sinar-X *bremsstrahlung* (Krane, 2011: 92). Sinar-X *bremsstrahlung* mempunyai spektrum energi kontinyu. Gambar 2.4

menunjukkan berkas elektron cepat mengalami perlambatan dalam medan magnet atom anoda sehingga mengeluarkan radiasi (Suyatno, 2008). Radiasi ini memiliki aneka ragam panjang gelombang, oleh karena itu proses *bremstrahlung* dapat dialami elektron berulang kali. Pemanfaatan sinar-X di radiodiagnostik adalah sebagai penegak diagnosa suatu kelainan atau penyakit (Fadhila, 2011).



**Gambar 2.4.** Sinar-X *Bremstrahlung* (Khan, 2003: 34)

Frekuensi maksimum sinar-X dapat dipancarkan oleh sinar-X *bremstrahlung* dengan mempercepat elektron melalui tegangan keluaran (kV) pada target logam. Frekuensi maksimum diilustrasikan dengan Persamaan 2.1.

$$v_{max} = \frac{eV}{h} \quad (2.1)$$

Sesuai dengan panjang gelombang minimum yaitu

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \quad (2.2)$$

Dengan

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} Js$ )

$e$  = muatan elektron ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )

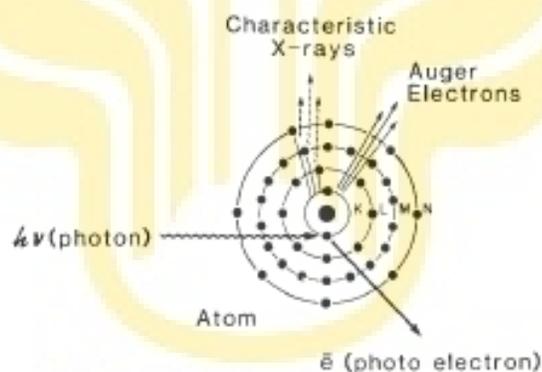
$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 m/s$ )

## 2.4. Interaksi Sinar-X Dengan Materi

Ada tiga interaksi yang berperan penting terjadi pada interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan materi:

### 2.4.1. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik merupakan efek yang didominasi oleh foton berenergi rendah ( $< 0,1\text{MeV}$ ) (Khan, 2003: 66). Efek fotolistrik terjadi ketika foton berenergi rendah datang menembus medium. Energi foton tersebut diserap secara keseluruhan oleh atom seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 (Andika, 2010).



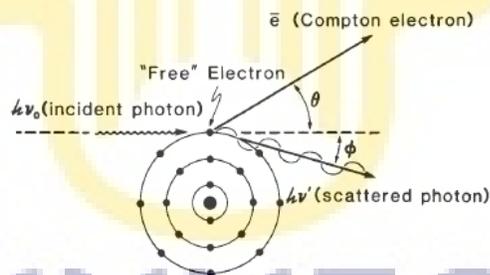
**Gambar 2.5.** Efek Fotolistrik (Khan, 2003: 66)

Jika besar energi foton tersebut kurang dari energi ikat elektron, maka elektron tidak akan terlepas dari lintasannya. Namun, jika besar energi foton tersebut lebih besar dari energi ikat elektron, maka elektron tersebut akan berpindah ke lintasan yang lebih luar dengan memancarkan sinar-X karakteristik. Elektron yang lepas dari lintasannya disebut *photoelectron*. Pada energi tinggi, efek fotolistrik dominan terjadi pada material dengan nomor atom tinggi (Khan, 2003: 66). Dalam

bidang radiodiagnostik, semakin besar jumlah absorpsi foton sinar-X dan perbedaan nomor atom objek maka semakin besar kontras radiograf (Rudi *et al*, 2013).

#### 2.4.2. Hamburan Compton

Hamburan Compton merupakan hamburan lenting sempurna antara sebuah foton dan elektron bebas (dengan tenaga ikat lemah). Gambar 2.6 merupakan tumbukan antara foton dengan elektron bebas, sebagian tenaga foton diserap elektron. Foton dengan tenaga lebih rendah akan dihamburkan dengan sudut yang sama dengan elektron yang ditumbuk, elektron yang ditumbuk ini menyebabkan terjadinya ionisasi atom dalam bahan. Hamburan Compton banyak terjadi untuk tenaga foton antara 200 KeV –5 MeV (Khan, 2003: 67).



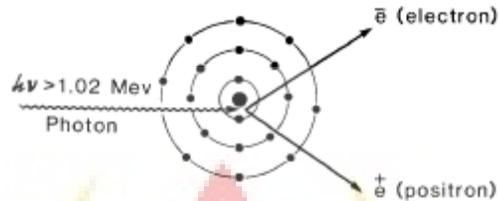
**Gambar 2.6.** Skema Hamburan Compton (Khan, 2003: 67)

#### 2.4.3. Produksi Pasangan

Proses lain yang terjadi ketika foton berenergi tinggi yaitu  $>1,02$  MeV berinteraksi dengan atom adalah produksi pasangan (Beiser, 1986: 62). Produksi pasangan merupakan proses interaksi foton dengan inti, dan dalam interaksi ini menghasilkan dua partikel, yakni sebuah elektron dan positron. Pada proses ini foton

menyerahkan semua tenaganya dan membentuk dua partikel elektron dan positron.

Gambar 2.7 berikut menunjukkan proses terjadinya produksi pasangan.



**Gambar 2.7.** Proses Produksi Pasangan (Khan, 2003: 71)

## 2.5. Koefisien Atenuasi

Ketika foton berinteraksi dengan materi, sebagian energi foton dibawa elektron sebagai energi kinetik, dan sebagian digunakan untuk melawan energi ikat atom atau berubah bentuk menjadi foton baru. Foton primer yang tidak berinteraksi dengan melintasi bahan dan keluar dari bahan (Wiriyosimin, 1995: 37). Absorpsi radiasi dari suatu bahan merupakan kemampuan dari suatu bahan dalam menyerap dan menahan suatu radiasi untuk lolos melewati bahan. Namun kemampuan absorpsi dari bahan tergantung pula dari jenis radiasi yang mengenai bahan absorber (Fitriawan, 2014). Jumlah foton primer yang lolos dari bahan akan berkurang secara eksponensial dengan Persamaan 2.3.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

Laju dosis radiasi elektromagnetik berbanding lurus dengan intensitas radasinya, sehingga Persamaan (2.3) menjadi :

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-\mu x} \quad (2.4)$$

Dengan

$I$  = Intensitas radiasi tanpa perisai

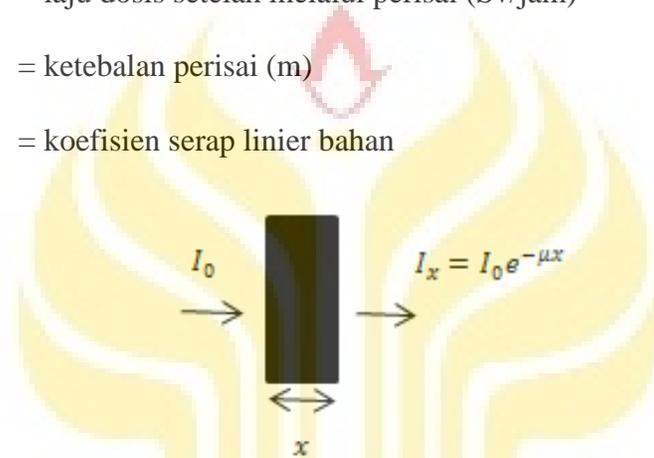
$I_0$  = Intensitas radiasi setelah melalui perisai

$\dot{D}$  = laju dosis tanpa perisai (Sv/jam)

$\dot{D}_0$  = laju dosis setelah melalui perisai (Sv/jam)

$x$  = ketebalan perisai (m)

$\mu$  = koefisien serap linier bahan



**Gambar 2.8.** Pengurangan Intensitas Radiasi Foton

## 2.6. Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi adalah tindakan yang dilakukan untuk mengurangi pengaruh radiasi yang merusak akibat paparan radiasi. Proteksi radiasi atau keselamatan radiasi berguna untuk menciptakan kondisi agar dosis radiasi yang mengenai manusia dan lingkungan hidup tidak melampaui nilai batas yang ditentukan (Sari, 2012). Mengingat radiasi pengion mempunyai potensi merugikan terhadap kesehatan, maka dalam penggunaan radiasi tersebut diperlukan langkah proteksi radiasi. Syarat yang harus dipenuhi agar kondisi lingkungan diluar ruangan menjadi aman bagi orang lain, ditetapkan sebesar 0,25 mRem/jam (Atmojo, 2011).

### 2.6.1. Efek Radiasi Pada Tubuh Manusia

Efek radiasi bagi kesehatan manusia dibagi menjadi 4 antara lain efek genetik, efek somatik, efek stokastik dan efek non stokastik / deterministik (Mahanani, 2006). Efek tersebut terjadi jika paparan radiasi yang diterima oleh manusia melebihi nilai batas dosis yang telah ditentukan. Efek genetik terjadi apabila dosis yang diterima oleh manusia mencapai  $4,0 \times 10^{-5} \text{ rem}^{-1}$  sedangkan efek somatik terjadi ketika dosis mencapai  $12,5 \times 10^{-5} \text{ rem}^{-1}$  dengan proteksi radiasi diharapkan dosis yang diterima oleh manusia kurang dari  $1 \times 10^{-4} \text{ rem}^{-1}$  (Khan, 2003: 402). Penerapan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi harus diupayakan agar pasien, pekerja radiasi dan anggota masyarakat di sekitar sumber radiasi menerima paparan radiasi serendah mungkin yang dapat dicapai (Bapeten, 2011).

### 2.6.2. Proteksi Radiasi Eksternal

Pemeriksaan diagnostik radiologi telah menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan. Sejak ditemukannya sinar-X oleh Roentgen pada tahun 1895 dan kemudian diproduksi peralatan radiografi pertama untuk penggunaan diagnostik, prinsip dasar radiografi tidak mengalami perubahan, yaitu memproduksi suatu gambar pada film reseptor dengan sumber radiasi dari suatu berkas sinar-X yang mengalami absorpsi dan atenuasi ketika melalui berbagai organ atau bagian pada tubuh (Putra, 2012).

Dalam teknik proteksi radiasi eksternal tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh radiasi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

1. Jenis sumber radiasi
2. Lama penyinaran

Dosis radiasi yang diterima oleh pekerja ataupun pasien di medan radiasi berbanding dengan waktu penyinaran radiasi tersebut. Semakin lama seseorang terpapar radiasi, semakin besar dosis radiasi yang diterimanya (Akhadi, 2001: 178).

$$D = \dot{D} t \quad (2.5)$$

Dengan

$D$  = dosis akumulasi yang diterima pekerja (Sv)

$\dot{D}$  = laju dosis serap dalam medan radiasi (Sv/jam)

$t$  = waktu penyinaran (sekon)

3. Jarak sumber radiasi dengan subyek

Paparan radiasi berkurang dengan semakin jauhnya jarak dari sumber radiasi. dengan besar laju dosis dirumuskan :

$$\dot{D} = k x \frac{1}{r^2} \quad (2.6)$$

Dengan

$\dot{D}$  = Laju dosis radiasi (Sv/jam)

$k$  = koefisien yang bergantung pada sumber radiasi

$r$  = jarak antara obyek dengan sumber radiasi (m)

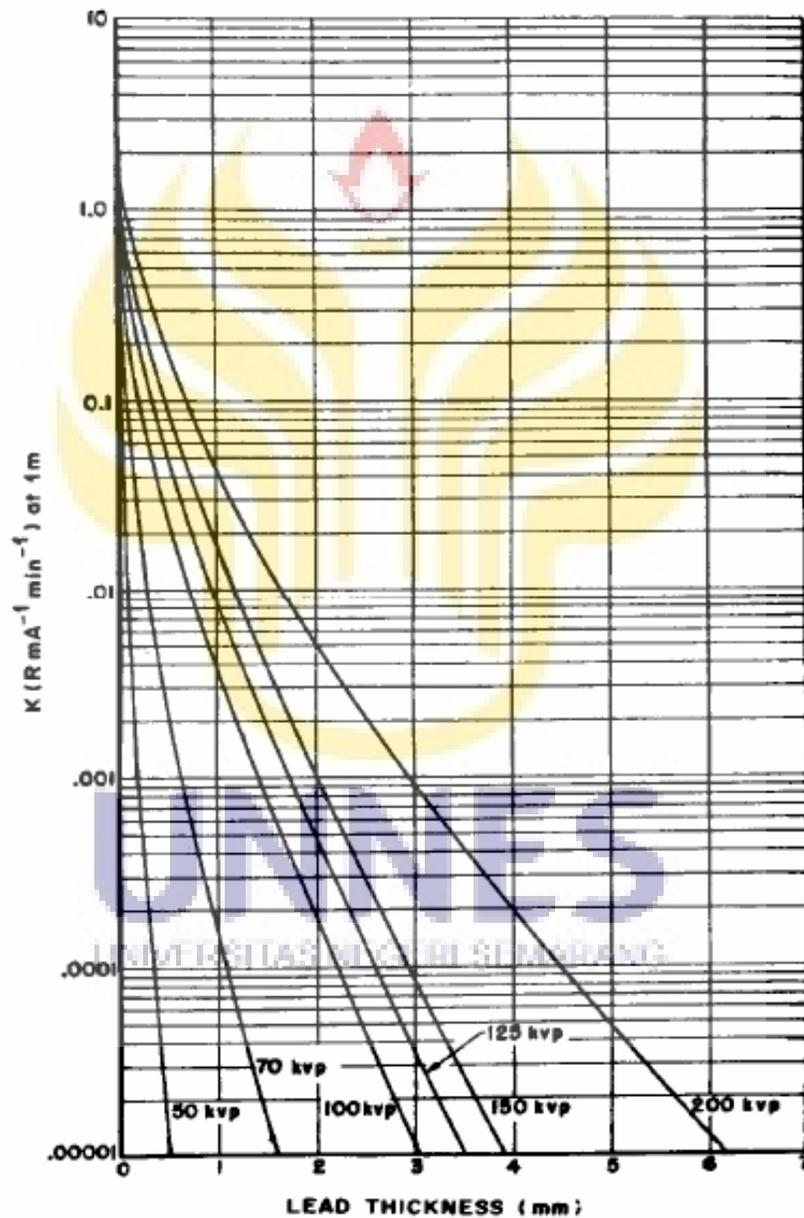
4. Perisai (Penghalang)

Persyaratan perisai radiasi untuk ruangan radiologi ditentukan oleh jenis peralatan dan energi radiasi yang dipakai. Tebal dinding penahan radiasi primer adalah dinding dari bata plesteran dengan tebal 25 cm atau beton setebal 15 cm yang setara dengan Pb 2 mm. Untuk penahan radiasi hambur diperlukan dinding bata berplester dengan tebal 15 cm dan untuk pintu kayu termasuk kusennya harus dilapisi dengan Pb setebal 2 mm, serta dilengkapi alat peringatan bahaya radiasi dan sistem pengaturan udara sesuai dengan kebutuhan (Maryanto, 2008).

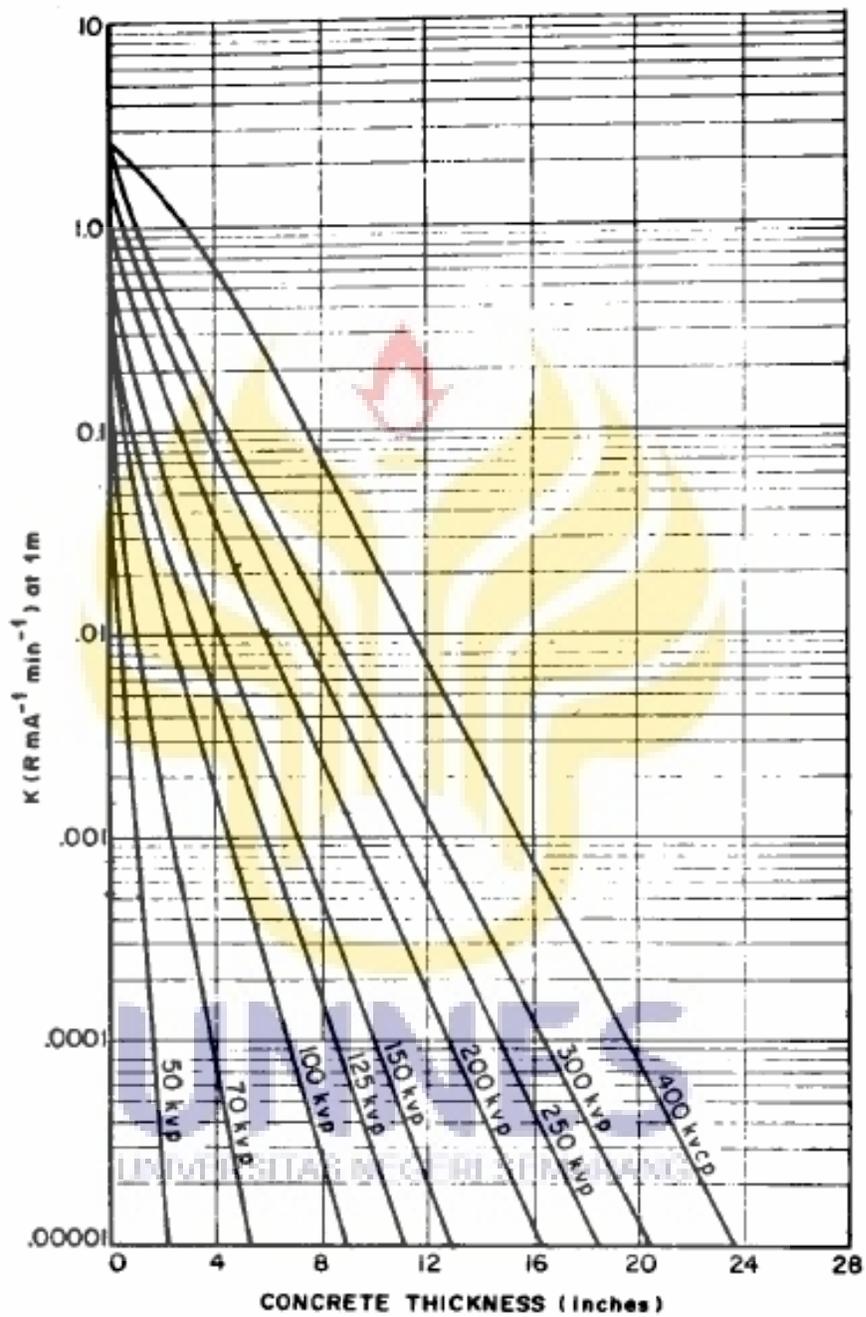
Sesuai dengan prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) yaitu tambahan dosis radiasi yang boleh diterima oleh pasien harus sekecil mungkin (Baim, 2005). Faktor utama dalam desain perisai sinar-X adalah intensitas sinar, yang merupakan fungsi dari tegangan tabung. Timbal digunakan sebagai perisai radiasi sinar-X yang dihasilkan pada potensial bawah 300 kV (Schimpf, 2001). Karena timbal merupakan logam yang memiliki nomor massa yang tinggi sehingga ketika berinteraksi dengan radiasi seperti foton sinar-X timbal dapat menyerap energi dari foton tersebut.

Menurut Atmojo (2003) timbal dapat digunakan sebagai bahan proteksi radiasi sinar-X dengan syarat berkas sinar-X yang keluar dari tabung pesawat sinar-X harus terkolimasi. Sehingga dalam dunia kesehatan ataupun industri timbal dengan berbagai ketebalan digunakan sebagai bahan proteksi radiasi selain depleted uranium (DU) dan tungsten (W) (Yuniarsari *et al*, 2013). Biasanya timbal digunakan sebagai bahan tambahan keamanan di ruang radiologi (IAEA, 2006). Hal ini dapat dilihat pada kurva faktor pelemahan berkas sinar-X. Perbandingan kurva faktor pelemahan

radiasi sinar-X dengan penahan radiasi timbal (Pb) dan beton terlihat pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10, dengan jarak antara detektor dan perisai radiasi sebesar 1 meter.



**Gambar 2.9** Faktor Pelemahan untuk Penahan Radiasi Timbal  
(National Bureau of Standard Handbook, 1961)



**Gambar 2.10** Faktor Pelemahan untuk Penahan Radiasi Beton  
(National Bureau of Standard Handbook, 1961)

Sumbu koordinat K dapat dirumuskan sebagai (Wiryosimin, 1995: 134):

$$K = \frac{Pd^2}{WUT} \quad (4.8)$$

Dengan

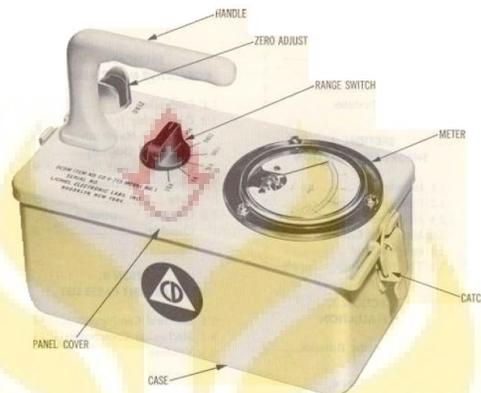
- $K$  = faktor pelemahan paparan radiasi (R per mA per menit)
- $P$  = laju paparan maksimum yang diijinkan (R per minggu)
- $d$  = jarak antara sumber sinar-X ke dinding penahan primer (m)
- $W$  = beban kerja selama seminggu (mA per minggu)
- $U$  = faktor bagian dari beban kerja
- $T$  = faktor tempat tinggal

Timbal memiliki kerapatan massa lebih besar dibandingkan dengan beton. Sehingga untuk perisai radiasi diperlukan beton yang lebih tebal dibandingkan dengan timbal. Seperti pada Gambar 4.6 dan 4.7 pada tegangan 50 kVp membutuhkan 2 inchi perisai beton sedangkan dengan menggunakan perisai timbal hanya membutuhkan 0,5 mm pada energi yang sama.

### 2.7. *Surveymeter*

*Surveymeter* merupakan alat untuk memberikan informasi laju dosis radiasi. Sebagaimana fungsinya, suatu *surveymeter* harus bersifat portable meskipun tidak perlu sekecil sebuah dosimeter personal. Konstruksi *surveymeter* terdiri atas detektor dan peralatan penunjang. Cara pengukuran yang diterapkan adalah cara arus (*current mode*) sehingga nilai yang ditampilkan merupakan nilai intensitas radiasi. Secara

elektronik, nilai intensitas tersebut dikonversikan menjadi skala dosis, misalnya dengan satuan rongent/jam. Gambar 2.11 menunjukkan gambaran *surveymeter* analog.

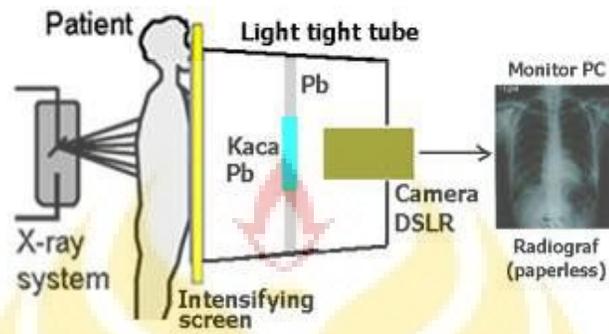


**Gambar 2.11.** *Surveymeter* analog (Lionel, 1961: 2)

## 2.8. Digital Radiography (DR)

Radiografi konvensional berbasis film sekarang telah beralih menjadi teknologi digital tanpa film, yaitu *Computed Radiography* (CR) dan sekarang ini sudah terdapat penelitian baru yang berbasis *Digital Radiography* (DR). Prinsip dari *Digital Radiography* (DR) adalah memanfaatkan perbedaan penyerapan sinar-X pada bagian-bagian obyek atau tulang dan jaringan lainnya. Pada tulang padat, sinar-X yang diserap lebih banyak sehingga sinar yang datang ke *image plate* menjadi berkurang mengakibatkan gambaran tulang menjadi lebih putih dibanding dengan jaringan tulang lainnya (Cameron et al, 1999). Pada sistem DR tidak memerlukan perangkat CR (*Computed Radiography*) seperti *image plate*, *image reader*, *image console*. Sehingga pemrosesan citra radiograf lebih praktis dengan menggunakan

sistem DR. Gambar 2.12 menunjukkan anatomi sistem sistem *Digital Radiography* (DR).



**Gambar 2.12.** Sistem *Digital Radiography* (DR) (Susilo *et al*, 2014)

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut

1. Nilai laju dosis radiasi berkuang terhadap bertambahnya ketebalan timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah sebagai perisai. Besar laju dosis radiasi berbanding lurus dengan besar energi sinar-X. Semakin besar energi sinar-X, maka semakin besar pula nilai laju dosis yang terukur.
2. Besar tegangan (kV) sinar-X juga berbanding lurus dengan energi radiasinya. Semakin besar nilai tegangan sinar-X maka energi radiasi sinar-X semakin besar pula. Sehingga daya tembus dari sinar-X tersebut semakin besar. Akibatnya pada tegangan tinggi, nilai laju dosis radiasi yang terukur semakin besar.
3. Semakin besar densitas optik maka semakin tinggi pula kontras citra. Dan semakin besar tegangan sinar-X maka semakin kecil nilai densitas optiknya. Karena nilai GL pada tegangan tinggi lebih kecil dibandingkan dengan nilai GL pada tegangan rendah.

## 5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dibeikan sebagai berikut

1. Pengukuran laju dosis radiasi dapat menggunakan *surveymeter* digital agar ketelitian hasil pengukurannya lebih besar.
2. Perlu dilakukan analisis CNR (*Contrast to Noise Ratio*) citra untuk mengetahui kontras citra radiograf dari timbal bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah.



## DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, Mukhlis. 1996. *Dasar – Dasar Proteksi Radiasi*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Andika, Rachmat. 2010. *Analisis Korelasi Koefisien Homogenitas Terhadap Besar FWHM Spektrum Sinar-X Pada Kualitas Radiasi RQR*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia
- Anwar, Edi Daenuri. 2011. *Sistem Proteksi Radiasi Analisis Terhadap Bidang Radiologi Rumah Sakit*. Jurnal Phenomenon Volume 1 Nomor 1.
- Ariyanto, Sudi. 1998. *Perhitungan Penahan Radiasi Alpha, Beta Dan Gamma*. Widyanuklida Pusat Pendidikan Dan Pelatihan BATAN.
- Atmojo, Sri Mulyono, Krismawan, Abdul Jalil. 2011. *Desain Pintu Ruang Pesawat Sinar-X Dari Bahan Komposit Karet Alam Timbal Oksida*. Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir BATAN. ISSN: 1411-0296
- Atmojo, Sri Mulyono. 2003. *Kajian Standar Nasional Indonesia 18-6480-2000, Untuk Pengukuran Ekuivalensi Timbal Bahan Proteksi Sinar-X*. *Proseding Seminar Pengembangan Teknologi Dan Perekayasaan Instrumentasi Nuklir*. ISSN: 1693-3346
- Baim, Sanford, Charles R. Wilson, E.Michael Lewiecki, Marjorie M. Luckey, Robert W. Downs, and Brian C. Lentle. 2005. *Precision Assessment and Radiation Safety for Dual-Energy X-Ray Absorptiometry*. Journal of Clinical Densitometry, vol. 8, no. 4, 371–37.
- Bapeten. 2011. *Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik Dan Intervensional*. Peraturan Kepala Badan Pengawasan Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2011.
- Baratha, Johan. 1991. *Keseimbangan Radioaktif Seri Uranium-238 Pada Beberapa Sampel Dari Kalan Menggunakan Spektrometer  $\alpha$  Dan  $\gamma$* . *Proseding Reaktor Nuklir dalam Penelitian Sains dan Teknologi Menuju Era Tinggal Landas*.
- Basdevant, Jean Louis, James Rich, & Michel Spiro. 2004. *Fundamentals in Nuclear Physics from Nuclear Structure To Cosmology*. USA : Springer.
- Beiser, Arthur. 1986. *Konsep Fisika Modern Jilid 3*. Jakarta: Erlangga
- Burcham, W.E. 1973. *Nuclear Physics An Introduction*. London: Longman Group Limited

- Bushong, S.C. 2001. *Radiologic Science for Technologists (7th ed.)*. U. S of America: A Harcourt Health Science Comp
- Daniel, Odeh, G. Ogbanje, S. A. Jonah. 2013. *X-rays and Scattering from Filters Used in Diagnostic Radiology*. International Journal of Scientific and Research Publications. Volume 3, Issue 7. ISSN 2250-3153
- Fadhila, Soraya Noor. 2011. *Proteksi Radiasi Di Instalasi Radiodiagnostik RSUD Dr Moewardi Surakarta*. KTI. Surakarta: Fakultas Kedokteran UNS
- Fahmi, Arif, K. Sofjan Firdausi, dan Wahyu Setia Budi. 2008. *Pengaruh Faktor Eksposi Pada Pemeriksaan Abdomen Terhadap Kualitas Radiograf Dan Paparan Radiasi Menggunakan Computed Radiography*. Berkala Fisika 11.4: 109-118.
- Fitriawan, Margi. 2014. *Kajian Teori Dasar Pada Nanomaterial Timbal Sebagai Proteksi Radiasi*. Volume 2. ISSN 1411-1349.
- Gabriel, J.F. 1996. *Fisika Kedokteran*, Jakarta: Buku Kedokteran.
- Haidekker, Mark A. 2013. *Medical Imaging Technology*. USA: Springer.
- International Atomic Energy Agency. 2006. *Safety Reports Series No. 47 Radiation Protection In The Design Of Radiotherapy Facilities*. Vienna Kesehatan Masyarakat. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- Khan, Faiz M. *The Physics of Radiation Therapy 3<sup>th</sup> edition*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Krane, Kenneth S. 2011. *Modern Physics Third Edition*. United State of America: John Wiley & Sons, Inc
- Kristiyanti, & Sri Mulyono Atmojo. 2005. Penentuan Daya Serap Apron Dari Komposit Karet Alam Timbal Oksida Terhadap Radiasi Sinar-X. *Prosiding PPI-PDIPTN Puslitbang Teknologi Maju-BATAN*. ISSN 0216-3128.
- Lionel Elektronik Laboratories. 1961. *Intruccion and Maintenance Manual Radiological Survey Meter*. New York: Brooklyn 37.
- Mahanani, Tri Pebri. 2009. *Proteksi Dan Pengendalian Bahaya Sinar Radioaktif Di Pabrik Hot Strip Mill (HSM) PT. Krakatau Steel Cilegon*. Skripsi. Surakarta: Fakultas Kedokteran UNS

- Maryanto, Djoko, Solichin, & Zaenal Abidin. 2008. Analisis Keselamatan Kerja Radiasi Pesawat Sinar-X di Unit Radiologi RSUD Kota Yogyakarta. *Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta*.
- McCaffrey, J.P., H. Shen, B. Downton, & E. Mainegra Hing. 2007. Radiation Attenuation By Lead And Nonlead Materials Used In Radiation Shielding Garments. Canada: *Ionizing Radiation Standards, National Research Council of Canada*
- Meredith, W.J, & J. B. Massey. 1977. *Fundamental Physics of Radiology*. Manchester: Year Book Medical Publishers
- Prayitno, Gunawan. 2009. Perhitungan Ketebalan Bahan Komposit Karet Alam Timbal Oksida Untuk Proteksi Radiasi Sinar-X 100 KeV. *Jurnal Perangkat Nuklir Vol 03, No 05, Mei 2009*. ISSN 1978-3515.
- Putra, May Adi. 2012. *Analisis Resiko Kegiatan Praktikum Teknik Radiografi Di Laboratorium Jurusan Teknik Radiodiagnostik Dan Radioterapi Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Jakarta I*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia
- Rudi, Pratiwi, Susilo. 2013. Pengukuran Paparan Radiasi Pesawat Sinar-X Di Instalasi Radiodiagnostik Untuk Proteksi Radiasi. *Unnes Physics Journal*. ISSN No 2252-6978.
- Sari, Silvia. 2012. *Pengembangan Sistem Manajemen Keselamatan Radiasi Sinar-X Di Unit Kerja Radiologi Rumah Sakit XYZ Tahun 2011*. Skripsi. Depok : Universitas Indonesia
- Schimpf, William, Donald J. MacKenzie Martin Z. Karson, Bernard R. Schmidt, J.E. Casteras and James J. Cullen. 2001. *A Guide to the Use of Lead for Radiation Shielding*. New York: Lead Industries Association.
- Serway, Raymond A, C.J Moses, & C.A Moyer. 2005. *Modern Physics Third Edition*. United State of America: Thomson Learning.
- Suhaemi, Tjipta, & Itjeu Karlina. 2008. Kajian Keselamatan Nuklir Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. *Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir* ISSN: 1978-0176.
- Susilo, Sunarno, E Setiowati, dan L Lestari. 2012. *Aplikasi Alat Radiografi Digital Dalam Pengembangan Layanan Foto Rontgen*. Jurnal Mipa Universitas Negeri Semarang. ISSN NO 0215-9945

- Susilo, Wahyu S.B., dan Kusminarto. 2013. *Aplikasi Perangkat Lunak Berbasis Matlab Untuk Pengukuran Radiograf Digital*. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia (Indonesian Journal of Physics Education) 9.1.
- Susilo, Wahyu Setia Budi, Kusminarto, dan G. B. Suparta. 2013. *Kajian Radiografi Digital Tulang Tangan*. Bekala Fisika. ISSN: 1410 – 9662
- Sutjipto, Tito. 1999. *Perancangan Dan Penahan Radiasi Di Unit Radiologi Untuk Diagnostik Menggunakan Sinar-X*. Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir 1.
- Suyatno, Ferry. 2008. *Aplikasi Radiasi Sinar-X Di Bidang Kedokteran Untuk Menunjang Kesehatan Masyarakat*. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir ISSN 1978-0176
- Trikasjono, Toto, Djoko Maryanto, & Bety Timorti. 2009. Analisis Keselamatan Pesawat Sinar-X Di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Umum Daerah Sleman Yogyakarta. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTBR-BATAN*.
- Wirjosimin, Suwarno. 1995. *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Wiyatmo, Yusman. 2009. *Fisika Nuklir Dalam Telaah Semiklasik Dan Kuantum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Yuniarsari. Leli, Kristiyanti, Bang Rozali, & Beny Syawaludin. 2013. Perancangan Perisai Radiasi Pada Kepala Sumber Untuk Pesawat Radioterapi Eksternal Menggunakan Co-60 Pada Posisi *Beam Off*. *Jurnal Perangkat Nuklir Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir (PRPN) – BATAN*, Vol 07. ISSN No. 1978-3515.