

T E S I S

**ANALISIS SIFAT STRUKTUR DAN EFEKTIVITAS APRON
POLIESTER/PVA/BaCO₃ SEBAGAI PERISAI RADIASI PENGION**

ARDIANSYAH

H032221008



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**ANALISIS SIFAT STRUKTUR DAN EFEKTIVITAS APRON
POLIESTER/PVA/BaCO₃ SEBAGAI PERISAI RADIASI PENGION**

T E S I S

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains
pada Program Studi Magister Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

**ARDIANSYAH
H032221008**

**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**ANALISIS SIFAT STRUKTUR DAN EFEKTIVITAS APRON
POLIESTER/PVA/BaCO₃ SEBAGAI PERISAI RADIASI PENGION**

Disusun dan diajukan oleh

ARDIANSYAH

H032221008

Telah Dipertahankan di Hadapan Panitia Ujian yang Dibentuk dalam Rangka Penyelesaian
Studi Program Magister Program Studi Fisika Fakultas Matematika Dan Ilmu
Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
Pada Tahun 2023

Dan Dinyatakan Telah Memenuhi Syarat Kelulusan

Menyetujui

Penasehat Utama,

Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.
NIP. 19750907 200003 1 006

Penasehat Pendamping,

Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, M.T.
NIP. 19630830 18903 2 001

Ketua Program Studi,

Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, M.T.
NIP. 19630830 18903 2 001

Dekan Fakultas,

Dr. Eng. Amiruddin, M.Si.
NIP. 19720515 199702 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ardiansyah
NIM : H032221008
Program Studi : Fisika
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

ANALISIS SIFAT STRUKTUR DAN EFEKTIVITAS APRON POLIESTER/PVA/BaCO₃ SEBAGAI PERISAI RADIASI PENGION

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut,

Makassar, 12 November 2022

Yang Menyatakan



Ardiansyah

ABSTRAK

Radiasi pengion digunakan secara luas dalam berbagai bidang, namun memiliki potensi dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Untuk melindungi pekerja radiasi dari paparan radiasi maka dibutuhkan sebuah perisai radiasi yang berupa apron. Penelitian ini berfokus pada pengembangan apron yang lebih ringan dengan menambahkan partikel BaCO_3 pada kain poliester sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan daripada timbal. Komposisi BaCO_3 dalam komposit poliester/PVA/ BaCO_3 divariasikan dengan berbagai persentase berat, yaitu 20, 30, 40, 50, dan 60 wt%. Setelah dilakukan analisis sifat struktur, morfologi permukaan, dan parameter perisai radiasi. Diperoleh informasi bahwa penambahan PVA pada komposit mengakibatkan perubahan dalam struktur kristal BaCO_3 . Ukuran kristal bervariasi dengan komposisi, dengan ukuran kristal terbesar terlihat pada BCO40. Selain itu, Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa komposisi dalam komposit Poliester/PVA/ BaCO_3 berpengaruh signifikan terhadap morfologi permukaan dalam sampel. Bentuk partikel BaCO_3 menyerupai silinder pejal dengan ujung semi-sferis menyerupai kapsul obat dan memiliki variasi dalam dimensi lateral, dengan panjang partikel bervariasi antara 1 hingga 5 μm dan diameter berkisar antara 0,2 hingga 0,8 μm . Kemudian, sampel BCO60 menunjukkan sifat perisai radiasi terbaik dari sampel lainnya berdasarkan beberapa parameter yang telah dihitung seperti μ , μ_m , MFP, TVL, HVL, $\sigma_{t,a}$, $\sigma_{t,el}$, N_{eff} , dan Z_{eff} . Pada energi 80 keV, HVL BCO60 sebesar 0.027 cm. selain itu, berdasarkan perbandingan nilai HVL eksperimental dengan teori menggunakan program Phy-X/PSD, dapat terlihat bahwa terdapat kesesuaian yang baik pada energi 40 dan 60 keV. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan yang berpotensi untuk mengarahkan perisai radiasi sinar-X yang berorientasi lingkungan ke arah yang lebih cerah di masa depan.

Kata kunci: Barium karbonat; Kain poliester; Perisai radiasi; Apron ringan

ABSTRACT

Ionizing radiation is widely used in various fields, but it poses potential negative health impacts on humans. To protect radiation workers from radiation exposure, radiation shielding in the form of aprons is required. This study focuses on the development of a lighter apron by incorporating BaCO₃ particles into polyester fabric as an environmentally friendly alternative to lead. The composition of BaCO₃ in the polyester/PVA/BaCO₃ composite was varied at different weight percentages: 20, 30, 40, 50, and 60 wt%. After analyzing the structural properties, surface morphology, and radiation shielding parameters, it was found that the addition of PVA in the composite led to changes in the BaCO₃ crystal structure. The crystal size varied with composition, with the largest crystals observed in BCO40. Furthermore, SEM analysis revealed that the composition in the Polyester/PVA/BaCO₃ composite significantly influenced the surface morphology of the samples. BaCO₃ particles exhibited a solid cylindrical shape with semi-spherical ends resembling pill capsules, with variations in lateral dimensions, ranging from 1 to 5 μm in length and 0.2 to 0.8 μm in diameter. Among all the samples, BCO60 demonstrated the most effective radiation shielding properties based on several calculated parameters such as μ , μ_m , MFP, TVL, HVL, σ_{ta} , σ_{tel} , N_{eff} , and Z_{eff} . At 80 keV, the HVL for BCO60 was 0.027 cm. Moreover, comparing the experimental HVL values with theoretical values using the Phy-X/PSD program showed good agreement at 40 and 60 keV energies. Overall, this research provides insights that have the potential to steer environmentally conscious X-ray radiation shielding towards a brighter future.

Keywords: Barium carbonate; Polyester fabric; Radiation shielding; Lightweight apron.

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Segala puji bagi Allah yang maha pemberi petunjuk lagi maha pemberi manfaat, yang maha mengetahui lagi maha luas karunia-Nya. Berkat limpahan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis dengan judul “**Analisis Sifat Struktur dan Efektivitas Apron Poliester/PVA/BaCO₃ Sebagai Perisai Radiasi Pengion**” yang merupakan syarat dalam menyelesaikan studi pada Program Studi Magister Fisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad ﷺ, Nabi yang perkataan, perilaku, dan diamnya menjadi patokan berperilaku dan beribadah umat islam setelah kitab suci Al-Qur’an.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini, penulis telah mengalami berbagai hambatan dan menyadari bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari kata sempurna, hal ini terjadi karena keterbatasan pengetahuan yang dimiliki oleh penulis. Namun atas kehendak-Nya hambatan tersebut berhasil dilalui oleh penulis sehingga penyusunan tesis ini dapat diselesaikan.

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua **Sukardi** (Bapak) dan **Rosmini** (Ibu). Kalian Bapak dan Ibu yang sangat luar biasa, saya harap kalian bangga punya anak sepertiku. Semoga kalian tetap sehat, bahagia, dan diberi umur yang panjang. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada saudara-saudara terkasih **Armin**, **Fitri Sumarni**, dan **Riska Sari** yang selalu memberikan dukungan-dukungan terbaiknya.

Terima kasih kepada seluruh dosen-dosen departemen fisika terkhusus kepada Bapak **Prof. Dr. Dahlang Tahir, M. Si.** selaku dosen penasehat utama yang telah mendorong dan mendukung penulis dalam menjalankan studinya. **Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, M.T.** selaku ketua prodi S2-Fisika sekaligus dosen

penasehat pendamping yang tetap baik. **Bapak Heryanto, S.Si, M.Si.** yang telah banyak membagikan ilmunya. **Bapak Prof. Dr. Bualkar Abdullah, M.Eng.Sc.,** **Bapak Prof. Dr. Rer-nat Wira Bahari Nurdin** dan **Prof. Dr. Nurlaela Rauf, M.Sc.** selaku tim dosen penguji pada penyelesaian tugas akhir penulis.

Terima kasih kepada Bapak/Ibu **Staf Pegawai FMIPA UNHAS,** terutama **Staf Departemen Fisika: Ibu Evi dan Kak Rana** yang selalu memberikan pelayanan terbaiknya. Kalian sangat baik.

Terima kasih kepada kakak-kakak, teman-teman, dan adik-adik yang sudah mengisi masa studi penulis: **Pak Adit, Kak Fahrul, Kak Ina, Kak Rahmi, Kak Febri, Kak Uswa, Kak Reni, Kak Itto, Olak, Nita, Nunuk, Syarif, Azlan, Syahrul, Nasroh.** Cerita yang telah kalian berikan sangat banyak dan begitu indah. Penulis sangat bersyukur telah mengenal kalian. Pasti akan ada rindu setelah kisah ini kita bungkus. Setelah ini, tempuhlah jalan sukses kalian masing-masing. Penulis akan menunggu kalian di meja bundar untuk menceritakan cerita sukses masing-masing.

Terima kasih juga kepada teman-teman seperjuangan yang hingga hari ini tetap menjadi teman cerita yang sehat: **Fahri, Roni, dan Rial.** Banyak motifasi dan inspirasi yang penulis dapat dari kalian. Terima kasih juga kepada teman cewek **Uci** dan **Asni** yang tetap mendukung penulis dalam perjalanannya.

Terima kasih kepada **Pesantren Darul Arqam Muhammadiyah – Gombara** yang telah menjadi wadah bagi penulis untuk merawat ilmu. **Rekan-rekan guru** yang selalu mendukung penulis dalam setiap urusannya dan **santri-santri** yang selalu memulihkan energi penulis di setiap akhir pekan setelah menjalani hari-hari yang penat.

Terima kasih untuk **Semua Pihak** yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, kalian semua orang baik dan penulis senang telah mengenal kalian. Terima kasih telah berkontribusi dalam hidup penulis terkhusus dalam penyelesaian tesis ini.

Akhir Kata, semoga Allah SWT memberikan segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah mengulurkan bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis berharap, semoga tesis ini dapat bermanfaat untuk diri penulis pribadi dan khalayak ramai. Aamiin.

Makassar, 12 November 2023

Ardiansyah

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I. PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Sifat Struktur Material	4
II.2 Interaksi Radiasi dengan Materi	4
II.3 Perisai Radiasi (Apron)	6
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Waktu dan Tempat Penelitian	10
III.2 Alat dan Bahan Penelitian	10
III.3 Prosedur Penelitian	10
III.4 Bagan Alir Penelitian	11
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Analisis Sifat Struktur	12
IV.2 Analisis Morfologi Permukaan	13
IV.3 Analisis Karakteristik Perisai Radiasi	17
BAB V. PENUTUP	
V.1 Kesimpulan	22
V.2 Saran	22
DAFTAR PUSTAKA	24
LAMPIRAN	29

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Efek fotolistrik	5
Gambar 2.2	Efek compton	5
Gambar 3.1	Bagan Alir Penelitian	11
Gambar 4.1	(a) Puncak difraksi XRD dari BaCO ₃ dan komposit Polyester/PVA/BaCO ₃ , (b) Spektrum XRD yang diperbesar dalam rentang 22,5° – 25,5°, (c) Data ukuran kristal, kepadatan dislokasi, dan regangan internal untuk setiap sampel	13
Gambar 4.2	Morfologi permukaan sampel pada perbesaran 25, 10, dan 5 mikron	14
Gambar 4.3	(a) Analogi bentuk partikel BaCO ₃ , (b) Distribusi panjang ukuran partikel BaCO ₃ , dan (c) Distribusi diameter ukuran partikel BaCO ₃	15
Gambar 4.4	Spektrum EDS dari semua sampel: sisi kiri (a-e) menggambarkan area yang dipilih untuk menampilkan spektrum di sisi kanan (a ₁ -e ₁)	16
Gambar 4.5	Koefisien attenuasi linier dan massa yang diperoleh secara eksperimental untuk setiap sampel pada energi 40, 60, dan 80 keV	18
Gambar 4.6	Perbandingan antara nilai HVL yang ditentukan secara eksperimen dan yang diestimasi secara teoretis untuk semua sampel pada energi 40, 60, dan 80 keV	18
Gambar 4.7	Perbandingan dari nilai TVL (a - c) dan nilai MFP (d - e) yang ditentukan secara eksperimental dan teoretis untuk setiap sampel pada tingkat energi tertentu.....	19
Gambar 4.8	(a) Atomic cross-section dan (b) Electronic cross-section dari setiap sampel pada rentang energi 0.008 hingga 15 MeV	20
Gambar 4.9	(a) Kepadatan elektron efektif (N _{eff}) dan (b) Nomor atom efektif (Z _{eff}) dari setiap sampel dalam rentang energi 0,008 - 15 MeV	21

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kode sampel komposit Poliester/PVA/BaCO ₃ yang dibuat	11
--	----

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pengaplikasian radiasi gelombang elektromagnetik secara luas dalam berbagai bidang seperti pertanian, pembangkit listrik, penelitian, dan kesehatan telah memberikan dampak positif yang besar terhadap kehidupan manusia [1]. Dalam bidang kesehatan, salah satu teknologi medis yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik adalah radiografi. Radiografi adalah teknologi medis yang mentransmisikan sinar-X ke tubuh manusia dan menggunakan perbedaan kepadatan zat dalam tubuh manusia untuk menggambarkan struktur anatomi [2]. Namun, disisi lain juga terdapat dampak negatif yang bahkan dapat berujung pada kematian [3]. Paparan radiasi radiasi sinar-X yang berlebihan pada tubuh manusia dapat menyebabkan masalah kesehatan seperti kemandulan, mutasi genetik, dan kanker [4,5]. Masalah kesehatan tersebut terjadi akibat efek dari interaksi foton radiasi dengan materi yang dikenainya. Interaksi-interaksi yang umum terjadi antara foton sinar-X dengan materi yaitu efek fotolistrik dan efek Compton [4,6,7].

Melihat efek paparan radiasi yang sangat membahayakan, penggunaan perisai radiasi oleh para pekerja radiasi perlu dilakukan [8]. Bentuk perisai radiasi yang digunakan oleh para pekerja radiasi yaitu apron. Apron merupakan pelindung sinar-x representatif yang diproduksi dalam bentuk pakaian. Apron yang tersedia saat ini terbuat dari timbal yang memberikan beban fisik pada pemakainya karena massanya mencapai 3.15–4.95 kg. Massa tersebut akan membuat para penggunanya tidak nyaman, sehingga menyulitkan untuk bergerak secara efisien untuk melakukan tanggung jawab yang diperlukan [9]. Penggunaan timbal sebagai bahan apron yang komersil didasarkan pada nomor atom yang tinggi sehingga memiliki kemampuan untuk menyerap energi foton yang mengenainya [10,11]. Namun, beberapa literatur telah melaporkan kekurangan penggunaan timbal sebagai material proteksi radiasi diantaranya: toksisitas tinggi, tidak tahan lama, sangat kaku, dan berat. Oleh karena itu, beberapa tahun belakangan ini sejumlah peneliti telah memfokuskan kajiannya pada bidang proteksi radiasi khususnya

pengembangan material alternatif ramah lingkungan pengganti timbal. Salah satu material alternatif yang banyak menarik minat para peneliti yaitu barium [4,12–14]. Hal itu dikarenakan beberapa keunggulan yang dimiliki barium yaitu tidak beracun dan memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mengatenuasi energi foton. Pada literatur [4] dilaporkan bahwa pada energi tinggi (662 keV), perisai radiasi yang mengandung unsur barium lebih unggul dibandingkan perisai radiasi yang mengandung timbal. Laporan tersebut didasarkan pada nilai *half value layer* (HVL) yang dimiliki keduanya. Selain HVL, terdapat beberapa parameter radiasi yang dapat digunakan untuk menilai efektivitas suatu perisai radiasi diantaranya: koefisien atenuasi linear (μ), koefisien atenuasi massa (μ_m), *tenth value layer* (TVL), *mean free path* (MFP), *atomic cross-section* ($\sigma_{t,a}$), *electronic cross-section* ($\sigma_{t,el}$), kerapatan elektron efektif (N_{eff}), dan nomor atom efektif (Z_{eff}) [4].

Pada beberapa literatur terbaru, dilaporkan sebuah apron ringan yang memiliki kemampuan yang baik dalam mengatenuasi radiasi pengion [15,16]. Apron tersebut dibuat dengan menambahkan partikel-partikel logam pada kain. Penambahan partikel logam pada kain untuk mengabsorpsi radiasi sudah banyak dilaporkan beberapa tahun terakhir, namun kebanyakan untuk menyerap radiasi gelombang mikro [17–21]. Referensi [16], merupakan salah satu literatur yang melaporkan penambahan partikel logam pada kain untuk mengatenuasi radiasi pengion. Partikel logam yang digunakan yaitu BaO dan Bi₂O₃. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa kain poliester yang ditambahkan partikel BaO lebih unggul dari Bi₂O₃. Kemudian, kain yang ditambahkan BaO 30% memiliki kemampuan yang lebih baik dari penambahan BaO 50%. Hasil yang diperoleh tersebut tidak terlepas dari sifat struktur dan morfologi sampel.

Berdasarkan uraian diatas maka pada penelitian ini, akan dilakukan pembuatan apron dengan menambahkan partikel BaCO₃ pada kain poliester. BaCO₃ merupakan salah satu turunan dari Barium yang harganya lebih terjangkau dan ketersediaannya lebih melimpah dari BaO. Parameter-parameter radiasi seperti μ , μ_m , MFP, TVL, HVL, $\sigma_{t,a}$, $\sigma_{t,el}$, N_{eff} , dan Z_{eff} akan dianalisis untuk mengetahui efektivitas apron Poliester/PVA/BaCO₃ yang telah dibuat. Pengujian menggunakan *X-ray diffraction* (XRD) dan *Scanning electron microscopy* (SEM) juga akan dilakukan untuk mengetahui sifat struktur dan morfologi sampel.

I.2 Rumusan Masalah

- I.2.1 Bagaimana sifat struktur dan morfologi apron Poliester/PVA/BaCO₃?
- I.2.2 Bagaimana efektivitas apron Poliester/PVA/BaCO₃ sebagai perisai radiasi pengion?

I.3 Tujuna Penelitian

- I.3.1 Menganalisis sifat struktur dan morfologi apron Poliester/PVA/BaCO₃.
- I.3.2 Menganalisis efektivitas apron Poliester/PVA/BaCO₃ sebagai perisai radiasi pengion.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sifat Struktur Material

Sifat struktur merupakan salah satu sifat dasar material yang perlu diketahui sebelum dimanfaatkan untuk aplikasi tertentu. Berdasarkan referensi [22] beberapa sifat struktur material seperti ukuran kristal (D), kepadatan dislokasi (δ), dan regangan internal (ϵ) dapat ditentukan secara kuantitatif berdasarkan spektrum *X-ray diffraction* (XRD). Ukuran kristal mengacu pada dimensi fisik dari struktur kristal yang dapat mempengaruhi sifat dan karakteristik materi. Kepadatan dislokasi menggambarkan jumlah dislokasi per unit volume dalam kristal, yang dapat memengaruhi sifat mekanik dan plastisitas bahan. Regangan internal adalah distorsi atau deformasi yang terjadi di dalam kristal, yang dapat mempengaruhi jarak antar atom.

Penentuan ukuran kristal dari spektrum XRD dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer [22]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.1)$$

dimana K adalah konstanta (0,98), λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah nilai FWHM (rad), dan θ adalah sudut difraksi. Berdasarkan nilai ukuran kristal, kepadatan dislokasi (δ) yang menunjukkan kecacatan dalam suatu kristal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Williamson-Smallman's [22,23]:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.2)$$

Untuk menghitung regangan internal (ϵ), dapat digunakan persamaan berikut [22]:

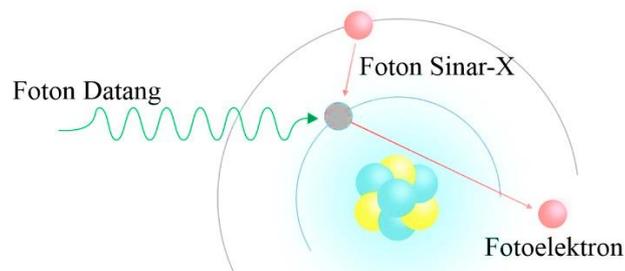
$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2.3)$$

II.2 Interaksi Radiasi Pengion dengan Materi

Radiasi pengion seperti sinar-x merupakan salah satu gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang pendek dan memiliki energi tinggi. Mekanisme yang paling signifikan mempengaruhi efektifitas suatu material perisai radiasi sinar-X yaitu efek fotolistrik dan efek compton. Efek fotolistrik terjadi ketika foton datang memiliki energi rendah, dibawah 0,5 MeV. Efek compton dominan terjadi bila energi foton $> 0,5$ MeV [4].

II.2.1. Efek Fotolistrik

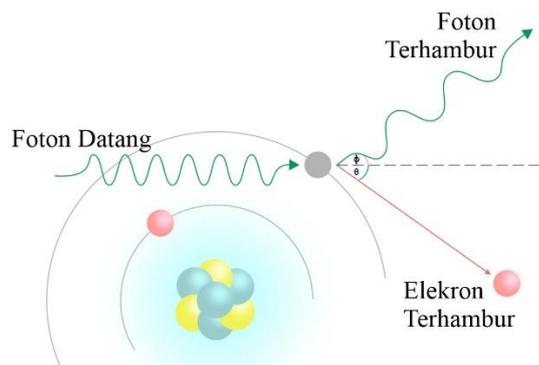
Efek fotolistrik adalah suatu fenomena yang terjadi ketika energi foton yang mengenai materi diserap sepenuhnya oleh elektron dalam atom. Akibatnya, elektron tersebut dapat terlepas dari atom dan menghasilkan ion jika energi foton datang lebih besar dari energi ikat elektron. Energi elektron yang dipancarkan sama dengan energi foton datang dikurangi energi ikat elektron. Elektron yang terlepas (fotoelektron) dapat menyebabkan peristiwa ionisasi sekunder saat bergerak melalui materi di sekitarnya [4].



Gambar 2.1 Efek fotolistrik

II.2.2. Efek Compton

Mekanisme berikutnya yang dapat terjadi ketika foton menabrak suatu medium yaitu efek Compton. Efek Compton merupakan sebuah fenomena dimana elektron dalam atom menyerap sebagian energi foton dan kemudian membelokkannya dengan sudut ϕ , sedangkan elektron yang ditumbuk terlempar pada sudut θ keluar lintasan. Hasil dari interaksi tersebut yaitu pembentukan ion. Namun, foton yang dibelokkan terus berjalan melalui materi sampai seluruh energi kinetiknya habis akibat interaksi dengan elektron lain dengan cara yang sama atau melalui mekanisme interaksi lain [4].



Gambar 2.2 Efek Compton

II.3 Perisai Radiasi (Apron)

Proteksi radiasi merupakan aspek yang sangat penting dalam pengendalian bahaya kesehatan lingkungan akibat radiasi. Proteksi radiasi bertujuan untuk melindungi para pekerja radiasi dan masyarakat umum dari bahaya penggunaan zat radioaktif dan atau sumber radiasi lainnya. Oleh karena itu, diterapkan tiga strategi dasar sebagai acuan pada sistem proteksi radiasi, yaitu: mengurangi waktu berada di sekitar sumber radiasi, memposisikan diri sejauh mungkin dari sumber radiasi, dan menggunakan perisai radiasi [8,9].

Efektifitas material sebagai perisai radiasi dapat didasarkan dari beberapa parameter diantaranya: koefisien atenuasi linear (μ), koefisien atenuasi massa (μ_m), *atomic cross-section* ($\sigma_{t,a}$), *electronic cross-section* ($\sigma_{t,el}$), nomor atom efektif (Z_{eff}), kerapatan elektron efektif (N_{eff}), *half-value layer* (HVL), *tenth-value layer* (TVL), dan *mean free path* (MFP) [4].

II.3.1. Koefisien Atenuasi Linear dan Koefisien Atenuasi Massa

Koefisien atenuasi linear (μ) adalah fraksi terkecil dari intensitas berkas foton yang hilang pada setiap ketebalan material yang dilaluinya. Secara sederhana koefisien atenuasi linier mengukur kemampuan material untuk mengurangi intensitas radiasi saat melintasinya. Nilai μ bergantung pada jenis radiasi, energi radiasi, dan sifat-sifat material medium yang dilewati. Semakin tinggi nilai μ , semakin besar kemampuan material dalam mengabsorpsi radiasi. Secara matematis μ dapat dituliskan sebagai berikut [3,4]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.4)$$

dimana I_0 adalah Intensitas radiasi sebelum menembus bahan, I adalah Intensitas radiasi setelah menembus bahan, x adalah ketebalan bahan perisai radiasi (cm). Persamaan (2.4) menggambarkan hubungan eksponensial antara intensitas radiasi (I) dengan jarak (x) yang dilalui di dalam medium. Ketika radiasi melintasi medium, intensitasnya berkurang secara eksponensial dengan faktor $e^{-\mu x}$, di mana e adalah bilangan Euler (~ 2.71828).

Setelah mengetahui nilai μ , nilai koefisien atenuasi massa (μ_m) dapat dihitung. Koefisien atenuasi massa menggambarkan sejauh mana partikel radiasi dapat dihambat atau diabsorpsi oleh medium saat melewati material tersebut.

Koefisien atenuasi massa bergantung pada kombinasi antara koefisien atenuasi linier (μ) dan kerapatan medium (ρ). Kerapatan medium mengacu pada massa per unit volume material. Kerapatan yang lebih tinggi akan menyebabkan partikel radiasi mengalami lebih banyak tumbukan dengan atom dalam medium, sehingga meningkatkan kemungkinan interaksi dan penyerapan radiasi. Dengan membagi μ dengan ρ , didapatkan μ_m , yang memberikan informasi tentang seberapa besar kemampuan material dalam menghambat atau mengurangi intensitas radiasi dengan mempertimbangkan kerapatan material tersebut. Secara matematis dituliskan dalam persamaan (2.5) [3]:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

Semakin tinggi nilai koefisien atenuasi massa, semakin efektif material tersebut dalam mengurangi paparan radiasi.

II.3.2. *Atomic Cross-Section* dan *Electronic Cross-Section*

Cross-section adalah ukuran probabilitas interaksi antara foton yang datang dengan material melalui proses fotoabsorpsi atau hamburan. *Atomic cross-sections* ($\sigma_{t,a}$) adalah ukuran yang digunakan untuk menggambarkan seberapa besar kemungkinan interaksi antara partikel radiasi dengan atom-atom dalam medium. *Electronic cross-sections* ($\sigma_{t,el}$) adalah ukuran yang digunakan untuk menggambarkan kemungkinan interaksi partikel radiasi dengan elektron-elektron dalam medium. *Electronic cross-sections* menggambarkan peluang interaksi yang terkait dengan penyerapan energi oleh elektron dalam medium. Secara matematis $\sigma_{t,a}$ dan $\sigma_{t,el}$ masing-masing ditunjukkan pada persamaan (2.6) dan (2.7) [4]:

$$(\sigma_{t,a}) = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i (\mu_m)_i \quad (2.6)$$

$$(\sigma_{t,el}) = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (2.7)$$

dimana $f_i = n_i / \sum_j n_j$ adalah *fractional abundance*, A_i adalah massa atom, dan Z_i adalah nomor atom. Jika nilai *Cross-section* tinggi, hal ini berarti bahwa material memiliki tingkat penyerapan yang tinggi dan pengurangan intensitas radiasi yang cepat.

II.3.3. Nomor atom efektif dan kerapatan elektron efektif

Nomor atom efektif (Z_{eff}) dan kerapatan elektron efektif (N_{eff}) adalah parameter-parameter yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik efektif atom dan elektron dalam suatu material. Z_{eff} menggambarkan jumlah efektif atom dalam material yang berinteraksi dengan partikel radiasi. Nilai Z_{eff} tidak selalu sama dengan jumlah atom sebenarnya dalam material, tetapi mencerminkan pengaruh atom-atom yang berkontribusi terhadap interaksi partikel radiasi. Z_{eff} bergantung pada jenis dan proporsi atom dalam material serta tingkat penyerapan radiasi oleh atom tersebut. Nilai Z_{eff} yang tinggi menunjukkan kemampuan material dalam menyerap radiasi dengan lebih efektif. Sedangkan, N_{eff} mengacu pada kepadatan elektron efektif dalam suatu material yang berperan dalam interaksi dengan partikel radiasi. N_{eff} mencerminkan jumlah dan distribusi energi elektron yang berkontribusi terhadap interaksi partikel radiasi dalam material. N_{eff} tidak selalu sama dengan kepadatan elektron sebenarnya dalam material, karena faktor-faktor seperti distribusi energi elektron dan struktur material yang relevan. Nilai N_{eff} yang tinggi menunjukkan potensi material dalam menyerap energi radiasi dengan lebih efisien. Secara matematis, Z_{eff} dan N_{eff} dituliskan pada persamaan (2.8) dan (2.9) [4]:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (2.8)$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,el}} \quad (2.9)$$

II.3.4. Half-Value Layer, Tenth Value Layer, dan Mean Free Path

Half-Value Layer (HVL) merujuk pada ketebalan material yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi sebesar setengah dari intensitas awalnya. Dalam hal ini, setengah nilai intensitas radiasi yang melewati material diserap atau ditransmisi. HVL dapat digunakan untuk menggambarkan daya serap material terhadap radiasi. Semakin kecil nilai HVL, semakin besar kemampuan material untuk menyerap radiasi. *Tenth-Value Layer* (TVL) adalah ketebalan material yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi sebesar sepuluh persen atau 1/10 dari intensitas awalnya. TVL digunakan sebagai ukuran untuk menggambarkan penyerapan radiasi secara lebih detail pada tingkat yang lebih rendah. TVL memberikan gambaran tentang daya serap material terhadap radiasi pada tingkat

intensitas yang lebih rendah dibandingkan dengan HVL. *Mean Free Path* (MFP) adalah jarak rata-rata yang ditempuh oleh partikel radiasi sebelum mengalami interaksi (seperti penyerapan atau penyebaran) dengan materi. MFP dapat didefinisikan sebagai rasio antara total jarak tempuh partikel radiasi dan jumlah interaksi yang terjadi. MFP digunakan untuk menggambarkan seberapa jauh partikel radiasi dapat menembus materi sebelum mengalami interaksi dengan atom atau elektron dalam material. Semakin besar MFP, semakin jauh partikel radiasi dapat menembus material sebelum mengalami interaksi. HVL, TVL, dan MFP dapat ditentukan berdasarkan nilai koefisien atenuasi linear (μ) menggunakan persamaan (2.10), (2.11), dan (2.12) [2,4,9].

$$\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.10)$$

$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.11)$$

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (2.12)$$