

T E S I S

**SINTESIS DAN ANALISIS PERBANDINGAN PELINDUNG RADIASI
SINAR-X BERBAHAN (SELULOSA/BISMUTH) DAN (SELULOSA/
TUNGSTEN) SEBAGAI PERISAI FLEKSIBEL**

Disusun dan Diajukan oleh:

RIFQAH NURUL IHSANI

H032222004



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**SINTESIS DAN ANALISIS PERBANDINGAN PELINDUNG RADIASI
SINAR-X BERBAHAN (SELULOSA/BISMUTH) DAN (SELULOSA/
TUNGSTEN) SEBAGAI PERISAI FLEKSIBEL**

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*

**RIFQAH NURUL IHSANI
H032222004**

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

2024

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**SINTESIS DAN ANALISIS PERBANDINGAN PELINDUNG RADIASI SINAR-X
BERBAHAN (SELULOSA/ BISMUTH) DAN (SELULOSA/TUNGSTEN)
SEBAGAI PERISAI FLEKSIBEL**

Disusun dan diajukan oleh

RIFQAH NURUL IHSANI


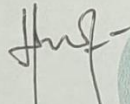
H032222004

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 2024
Dan Dinyatakan Telah Memenuhi Syarat Kelulusan

Menyetujui

Penasehat Utama,

Penasehat Pendamping,

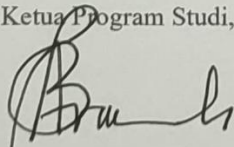


Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.
NIP. 19750907 200003 1 006

Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.
NIP. 19650305 199103 1 008

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas,



Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, M.T.
NIP. 19630830 198903 2 001

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rifqah Nurul Ihsani
NIM : H032222004
Program Studi : Fisika
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

SINTESIS DAN ANALISIS PERBANDINGAN PELINDUNG RADIASI SINAR-X BERBAHAN (SELULOSA/ BISMUTH) DAN (SELULOSA/ TUNGSTEN) SEBAGAI PERISAI FLEKSIBEL

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, 2 Mei 2024

Yang Menyatakan



Rifqah Nurul Ihsani

ABSTRAK

Penggunaan sinar-X berkembang sangat pesat khususnya di bidang industri medis. Daya tembus yang kuat dari sinar-X menyebabkan masalah kesehatan yang serius. Semakin lama paparan radiasi yang menembus sel normal dapat mengakibatkan mutasi gen, kanker, dan bahkan kematian. Perlindungan terhadap paparan radiasi diperlukan untuk mencegah dampak negatif yang terjadi. Apron harus dibuat fleksibel sehingga nyaman saat digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat sampel apron dengan metode sederhana yang terbuat dari Selulosa sebagai matriks dan membandingkan Bismuth/Tungsten sebagai pengisi dengan konsentrasi bismuth 11%, 8%, dan 3% sebagai material perisai radiasi sinar-X yang efektif. Karakterisasi yang dilakukan diantaranya *fourier transform infrared* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi dan komposisi kimia sampel, *x-ray diffraction* (XRD) untuk menganalisis ukuran kristal sampel, dan *x-ray mobile* untuk mengetahui kinerja perisai radiasi. Dalam penelitian ini, material perisai radiasi terbaik dengan koefisien atenuasi linier dan koefisien atenuasi massa yang tinggi, nilai HVL, dan TVL yang rendah dihasilkan oleh sampel dengan jenis pengisi Bismuth konsentrasi 11%. Hal ini juga dikonfirmasi dengan nilai kuat tarik dan kuat mulur yang tinggi dan nilai modulus young yang rendah menunjukkan fleksibilitas dari material yang dihasilkan.

Kata kunci: Sinar-X, Pelindung radiasi, Selulosa, Bismuth, Tungsten

ABSTRACT

The use of X-rays is growing very rapidly, especially in the medical industry. The strong penetrating power of X-rays causes serious health problems. Longer exposure to radiation that penetrates normal cells can result in gene mutations, cancer and even death. Protection against radiation exposure is necessary to prevent negative impacts from occurring. The apron must be made flexible so that it is comfortable when used. This research aims to make apron samples using a simple method made from Cellulose as a matrix and compare Bismuth/Tungsten as a filler with bismuth concentrations of 11%, 8% and 3% as an effective X-ray radiation shielding material. The characterization carried out included Fourier transform infrared (FTIR) to determine the functional groups and chemical composition of the sample, x-ray diffraction (XRD) to analyze the crystal size of the sample, and mobile x-ray to determine the radiation shielding performance. In this research, the best radiation shielding material with a high linear attenuation coefficient and mass attenuation coefficient, low HVL and TVL values was produced by a sample with a Bismuth filler concentration of 11%. This is also confirmed by the high tensile strength and yield strength values and the low Young's modulus values indicating the flexibility of the resulting material.

Keywords: X-rays, Radiation shielding, Cellulose, Bismuth, Tungsten

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “**Sintesis Dan Analisis Perbandingan Pelindung Radiasi Sinar-X Berbahan (Selulosa/ Bismuth) Dan (Selulosa/ Tungsten) Sebagai Perisai Fleksibel**” yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Magister (S2) Departemen Fisika Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Lantunan sholawat dikirimkan kepada Nabi Muhammad Shalallahu Alaihi Wassalaam, yang membawa umatnya dari alam kegelapan menuju alam yang terang benderang seperti yang dirasakan saat ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini tidak terlepas dari adanya hambatan dan jauh dari kata sempurna. Hal ini terjadi karena pengetahuan dan kemampuan dari penulis yang penuh dengan keterbatasan. Oleh karena itu, tesis ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan tesis ini. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih setulus-tulusnya kepada:

1. Ucapan terima kasih yang tiada tara untuk kedua orang tua penulis, Bapak **Abidin** dan Ibu **Rosmah** yang telah menjadi orang tua terhebat sejagad raya, yang selalu menuruti permintaan penulis, memberikan motivasi, nasehat, cinta, perhatian, kasih sayang, kesabaran yang luar biasa dalam setiap langkah penulis serta doa yang tak akan bisa penulis balas satu per satu. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada kakak penulis, **Rezky Awaliya Abidin** yang senantiasa memberikan dukungan kepada penulis, membangkitkan semangat dan perhatian yang terus menerus mengalir. *You are my everything in this world.*
2. Terima kasih kepada orang tua kedua saya selama kuliah, Ibu **Hajerah**, Ibu **Wahidah**, dan Ibu **Hasnah** yang telah menemani penulis selama menduduki bangku perkuliahan sampai berhasil dalam penyusunan tesis, perhatian dan dukungan yang tulus diberikan kepada penulis yang tiada hentinya.

3. Terima kasih kepada Bapak **Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.** selaku pembimbing utama dan Bapak **Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.** selaku dosen pembimbing pertama atas segala ilmu, motivasi, nasehat, dan kemudahan yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan tesis ini.
4. Kepada Ibu **Prof. Dr. Sri Suryani, DEA.** dan Ibu **Prof. Dr. Ir. Bidayatul Arminah, M.T** selaku penguji yang selalu meluangkan waktu kepada penulis dalam menyelesaikan setiap langkah demi langkah, mulai dari seminar proposal, seminar hasil dan ujian sidang.
5. Terima kasih juga kepada Bapak **Heryanto, S.Si., M.Si** dosen program studi Fisika Material yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang tak ternilai kepada penulis. Kepada **Staf Pegawai Departemen Fisika FMIPA UNHAS,** yang telah membantu dalam pengurusan administrasi penulis.
6. Kepada **Arlan Sahid,** penulis ucapkan terima kasih yang tak terhingga atas support, bantuan ditengah kesibukannya, kesabaran mengurangi overthinking penulis dan motivasi yang tiada henti diucapkan dalam penyusunan tesis ini. *You are the sun in my day, the wind in my sky, the waves in my ocean, and the beat in my heart.*
7. Kepada partner pejuang gelar ini, **Aul, Kak Fina, Kak Atika, Kak Ira,** dan **Ilham** terima kasih atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis dan suasana kelas yang selalu dibuat nyaman ditengah tumpukan tugas yang tiada henti. Terima kasih juga kepada kak **Syarif** yang telah membantu penulis dalam install aplikasi olah data.
8. Terima kasih kepada bestie MaLup keluarga kedua penulis, **Nabila Ar. Lamaniu, Asira, Eni** dan **Fara** yang selalu menghibur dikala penulis sedang galau dan sudah jadi tempat penulis berkeluh kesah. Terima kasih selalu ada disamping penulis baik itu suka maupun duka.
9. Semua pihak yang tidak disebutkan semuanya, yang telah dengan tulus ikhlas memberikan doa dan motivasi sehingga dapat terselesaikannya tesis ini.

Dalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, karena itu segala kritik dan saran yang membangun akan menempurnakan penulisan tesis serta bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Makassar, 2 Mei 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rifqah' with a stylized flourish at the end.

Rifqah Nurul Ihsani

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	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Sinar-X.....	4
II.2 Mekanisme perisai radiasi	5
II.3 Interaksi radiasi dengan materi	6
II.3.1 Efek Fotolistrik	6
II.3.2 Hamburan Compton.....	6
II.3.3 Produksi Pasangan	7
II.4 Parameter perisai radiasi	8
II.4.1 Koefisien Atenuasi Linier dan Koefisien Atenuasi Massa	8
II.4.2 <i>Half Value Layer</i> (HVL).....	9
II.4.3 <i>Tenth Value Layer</i> (TVL)	9
II.4.4 <i>Mean Free Path</i> (MFP).....	9
II.5 Selulosa.....	9
II.5.1 Sumber dan Struktur Kimia Selulosa	10
II.5.2 Keunggulan bahan Selulosa	10
II.6 Bismut (III) Nitrat.....	11
II.7 Tungsten.....	12
BAB III. METODE PENELITIAN	13
III.1 Tempat dan Waktu	13

III.2 Alat dan Bahan Penelitian	13
III.2.1 Alat Penelitian	13
III.2.2 Bahan Penelitian	13
III.3 Prosedur Penelitian	14
III.4 Karakterisasi	15
III.5 Bagan Alir Penelitian	16
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	17
IV.1 FTIR	17
IV.2 XRD	19
IV.3 <i>X-ray Mobile</i>	21
IV.4 Sifat Mekanik	26
BAB V. PENUTUP.....	30
V.1 Kesimpulan.....	30
V.2 Saran	30
DAFTAR PUSTAKA.....	32
LAMPIRAN.....	41

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Proses perisai radiasi.....	5
Gambar 2.2 Efek Fotolistrik.....	6
Gambar 2.3 Hamburan compton.....	7
Gambar 2.4 Produksi pasangan.....	8
Gambar 2.5 Struktur kimia selulosa.....	10
Gambar 3.1 Ilustrasi sintesis sampel apron.....	15
Gambar 3.2 Bagan alir penelitian.....	16
Gambar 4.1 Spektrum FTIR sampel apron.....	18
Gambar 4.2 Spektrum XRD sampel apron.....	21
Gambar 4.3 Koefisien atenuasi linier sampel apron.....	22
Gambar 4.4 Koefisien atenuasi massa sampel apron.....	23
Gambar 4.5 Nilai HVL dan TVL sampel apron.....	25
Gambar 4.6 Nilai MFP sampel apron.....	26
Gambar 4.7 Nilai kuat tarik dan kuat mulur sampel apron.....	28

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Komposisi dari sampel apron.....	14
Tabel 4.1 Gugus fungsi sampel apron.....	18
Tabel 4.2 Derajat kristalinitas dan ukuran kristal dari sampel apron	20
Tabel 4.3 Koefisien atenuasi linier dan koefisien atenuasi massa sampel apron.....	24

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di era modern saat ini telah mendorong penggunaan radiasi pengion, salah satu jenisnya adalah sinar-X. Energi yang dihasilkan oleh molekul yang bergerak sebagai gelombang elektromagnetik atau partikel disebut radiasi ionisasi [1][2]. Penggunaan radiasi pengion khususnya sinar-X digunakan pada bidang industri medis, radioterapi, radiografi, industri, penelitian, laboratorium, radiasi makanan, sterilisasi tanaman dan di bidang pertanian [3][4][5]. Organisasi Kesehatan Dunia menyatakan bahwa industri medis adalah yang paling banyak menggunakan radiasi pengion, sebanyak 3600 juta jumlah pemeriksaan radiologi diagnostik, 37 juta operasi kedokteran nuklir, dan 7,5 juta radioterapi dilakukan setiap tahun di seluruh dunia [6]. Tidak hanya penyerapan radiasi dosis tinggi tetapi juga penyerapan radiasi dosis rendah dalam jangka waktu yang lama telah merusak kesehatan manusia [7]. Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiologi melaporkan jika paparan yang diterima manusia lebih dari 20 mSv per tahun maka seseorang akan menyebabkan masalah kesehatan yang serius, diantaranya penyakit karsinogenesis, katarak, penyakit jantung, kerusakan sistem saraf pusat, dan sindrom radiasi akut lainnya. Selain itu, radiasi pengion juga dapat berbahaya bagi lingkungan [8][9]. Efek radiasi yang terakumulasi dapat mempengaruhi kehidupan di area tersebut dalam periode yang lama bahkan setelah sumber radiasi dihilangkan.

Terdapat 3 prinsip dalam proteksi radiasi yaitu, mengurangi waktu pemaparan, meningkatkan jarak yang lebih jauh dari sumber, dan pelindung radiasi [10]. Prinsip ketiga merupakan praktik terbaik untuk melindungi masyarakat, personel operasional, dan lingkungan dari radiasi berbahaya [11]. Salah satu alat pelindung diri yang wajib dimiliki oleh orang yang bekerja dibawah pengaruh radiasi adalah apron. Apron harus dibuat sedemikian rupa sehingga nyaman dipakai oleh pengguna dalam jangka waktu yang panjang dan tidak menghambat mobilitas saat digunakan [12]. Akan tetapi, kenyataan yang terlihat sekarang adalah Apron yang sebagian besar dibuat oleh industri dari pelat timbal yang berat dan kaku, sehingga membuat pekerja radiasi tidak nyaman [13]

Kim et al. pada tahun 2023 melaporkan bahwa apron dengan ketebalan setara timbal 0,3 dan 0,6 mm dapat mengurangi paparan radiasi masing-masing sebesar 78,1% hingga 78,5% dan 90,4% hingga 90,8%. Jarak 5 cm dari sisi meja mengurangi paparan radiasi sebesar 33,3% hingga 36,1% [14]. Timbal mempunyai nomor atom ($Z=82$) dan densitas ($11,340 \text{ g cm}^{-3}$) yang tinggi tetapi penggunaan timbal menjadi masalah yang semakin meningkat karena merupakan logam berat, beracun, dan akan memicu kerusakan lingkungan [15][16]. Untuk alasan ini, diperlukan suatu alternatif pengganti timah yang mempunyai sifat atenuasi yang tinggi.

Beberapa tahun terakhir kelompok peneliti tertarik dengan bahan polimer sebagai matriks dalam mendesain komposit perisai radiasi. **Wang et al., 2023** telah melakukan penelitian dengan membandingkan tungsten/bismuth dan bismuth/tungsten oksida sebagai material perisai radiasi dalam matriks *thermoplastic vulcanisates* (TPVs). Dengan bantuan mesin press hidrolis termal, koefisien atenuasi dan uji mekanik lebih unggul pada material tungsten/bismuth dibandingkan dengan bismuth/tungsten oksida. **Jiang et al., 2019** melaporkan kinerja material perisai radiasi dengan pengisi BaSO_4 dalam matriks selulosa. Hasilnya dilaporkan dengan penambahan BaSO_4 meningkatkan efektivitas material perisai radiasi sinar-X. **Erwina et al., 2023** juga telah melakukan penelitian terkait efektivitas pelindung radiasi sinar-X dengan variasi Cu dalam matriks selulosa. Koefisien atenuasi tinggi dan transmitansi rendah diperoleh 4% berat Cu. Polimer dipilih sebagai matriks karena kemampuan pelindungnya yang efektif, ringan, mudah dibuat, dan multifungsi [17]. Salah satu jenis polimer adalah Selulosa. Selulosa sebagai salah satu jenis polimer alami memiliki sifat yang stabil, aman, biokompatibel, dapat terurai secara alami, mudah diperoses dan murah sebagai bahan perisai radiasi [18][19]. Akan tetapi kepadatan dari Selulosa rendah sehingga dibutuhkan pengisi sebagai penguat Selulosa sebagai matriks. Atom logam atau nanopartikel seperti timbal, tungsten, bismut, barium, atau tembaga biasanya digunakan sebagai pengisi untuk menjadikannya sebagai bahan perisai radiasi yang menjanjikan [20][21]. Tungsten dan bismuth menjadi dua unsur material perisai radiasi karena memiliki nomor atom dan densitas yang tinggi.

Pada penelitian ini, material perisai radiasi apron dibuat dengan bahan dasar Selulosa dan pengisi berupa Bismuth dan Tungsten dibandingkan. Parameter seperti

koefisien atenuasi linier, koefisien atenuasi massa, *half value layer* (HVL), *tenth value layer* (TVL) dievaluasi sebagai dasar pertimbangan efektivitas material yang telah dibuat. Kemudian dikarakterisasi oleh *x-ray diffraction* (XRD) untuk ukuran kristal, *fourier transform infra-red* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi, efektivitas perisai radiasi sinar-x dengan menggunakan *X-ray mobile*, dan sifat mekanik bahan Apron.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana pengaruh *filler* terhadap sifat struktur, sifat mekanik dan efektivitas perisai radiasi sinar-X berenergi rendah dari Selulosa didoping dengan Bismuth dan Tungsten?

1.3 Tujuan Penelitian

Menganalisis pengaruh *filler* terhadap sifat struktur, sifat mekanik dan efektivitas perisai radiasi sinar-X berenergi rendah dari Selulosa didoping dengan Bismuth dan Tungsten

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sinar-X

Sinar-X ditemukan pada tahun 1895 oleh Wilhelm Conrad Roentgen, seorang warga negara Jerman. Pada percobaan tersebut diamati pergerakan elektron yaitu dari katoda ke anoda. Anoda berada dalam tabung kaca hampa udara. Generator sinar-X adalah tabung yang berisi filamen yang juga berfungsi sebagai komponen katoda dan anoda. Ketika filamen dipanaskan, elektron terlepas, dan ketika ada perbedaan potensial yang tinggi antara katoda dan anoda, elektron dipercepat menuju anoda. Percepatan elektron ini menyebabkan tumbukan tidak lenting sempurna antara elektron dan anoda, sehingga menghasilkan emisi sinar-X [22]. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik atau sering disebut foton dengan energi yang relatif tinggi, mereka memiliki daya tembus yang tinggi dengan panjang gelombang 0,01-10 nm dan menembus lapisan logam [23].

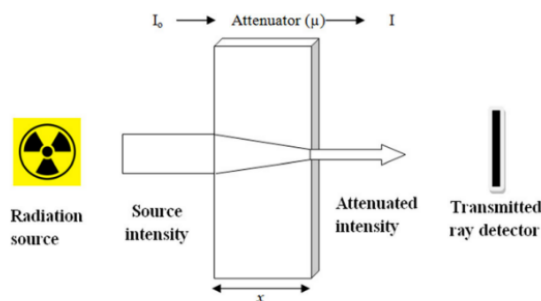
Sinar-X dapat dihasilkan oleh dua efek berbeda. Sinar-X dengan energi relatif rendah dipancarkan oleh elektron ketika melakukan transisi antara tingkat energi yang berbeda dalam sebuah atom. Sinar-X seperti itu memiliki energi yang terdefinisi dengan baik, yang ditentukan oleh nomor atom dan transisi elektronik tertentu. Energi tertinggi yang dapat diperoleh dengan cara ini adalah transisi elektron yang tidak terikat ke tingkat k uranium, yaitu 115,6 keV.

Sinar-X dibagi menjadi sinar-X karakteristik dan sinar-X Bremsstrahlung [24]. Sinar-X karakteristik dipancarkan dari atom yang tereksitasi. Setelah peristiwa eksitasi terjadi dalam atom, elektron kembali ke keadaan dasar dalam waktu yang sangat singkat, memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang disebut sinar-X karakteristik. Sinar-X dengan energi lebih tinggi dan spektrum energi yang luas dipancarkan oleh elektron yang dipercepat ketika mereka melewati dekat inti atom dan dibelokkan oleh medan listriknya. Efek ini disebut dengan istilah Jerman "*bremstrahlung*", yang berarti radiasi pengereman. Sinar-X yang dihasilkan dengan cara ini memiliki spektrum energi foton yang kontinu, mulai dari sekitar 30 keV hingga energi maksimum yang sama dengan energi kinetik elektron yang masuk.

II.2 Mekanisme perisai radiasi

Mengelola energi radiasi dan mencegahnya menyebabkan kerusakan fisik pada pekerja atau lingkungan adalah aspek penting dalam pemilihan material saat merancang fasilitas yang memancarkan spektrum elektromagnetik berisiko. Oleh karena itu, memastikan keamanan personel dan peralatan yang mungkin terancam oleh radiasi ionisasi sangat penting. Salah satu atribut sinar-X dan radiasi gamma yang membuatnya sangat berguna untuk berbagai aplikasi klinis, industri, pertanian, dan penelitian adalah kapasitas penembusan mereka.

Ketika sinar-X diarahkan ke dalam suatu material, sebagian foton ada yang diteruskan, dijerap, dan dipantulkan [25]. Materi dapat menyerap radiasi, yang berarti energi radiasi akan dipindahkan ke materi tersebut. Jika foton radiasi memiliki energi yang cukup tinggi, elektron-elektron dalam apron terlepas dari atom. Namun, apron dirancang untuk menyerap radiasi, elektron-elektron yang terlepas akan segera bertabrakan dengan atom lain dalam bahan apron, kehilangan energi kinetiknya dan dijerap oleh bahan apron. Penembusan, yang merupakan kebalikan dari redaman, dapat ditunjukkan sebagai bagian dari radiasi yang melewati material. Jumlah penembusan tergantung pada foton material individu, ketebalan (x), nomor atom (Z), dan densitas (ρ), seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 2.1**. Detektor sinar yang ditransmisikan adalah komponen yang "menerima" gambar sinar tak terlihat yang datang melalui material, yang dikenal sebagai intensitas yang tereduksi.



Gambar 2.1. Proses perisai radiasi [26]

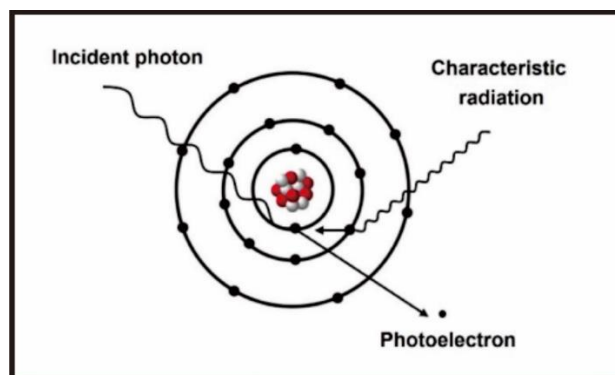
II.3 Interaksi radiasi dengan materi

Saat memilih material pelindung radiasi, penting untuk memahami mekanisme redaman radiasi. Efek fotolistrik, Hamburan Compton, dan Produksi pasangan adalah tiga mekanisme redaman yang paling signifikan untuk sinar-X [27].

II.3.1 Efek fotolistrik

Dalam efek fotolistrik, foton yang masuk berinteraksi dengan elektron inti dalam atom target, mengakibatkan pelepasan elektron inti diilustrasikan oleh **gambar 2.2**. Sebagian dari energi digunakan untuk mengatasi energi ikatan elektron dan sisanya menjadi energi kinetik fotoelektron yang terlepas. Pelepasan fotoelektron meninggalkan atom dalam keadaan tereksitasi yang tidak stabil. Ada dua cara atom kembali ke keadaan dasar: (i) Elektron luar mengisi lubang dalam dan menyebabkan pelepasan radiasi karakteristik. (ii) Sebuah elektron tertentu menyerap energi dan terlepas dari atom; elektron ini disebut elektron Auger [28]

Sinar-X karakteristik dan elektron Auger akan terlepas saat atom kembali ke keadaan normal [29]. Di sini terjadi hukum kekekalan energi. Ini terutama terjadi ketika energi foton yang masuk berada dalam kisaran 10 keV-100 keV dan meningkat dengan nomor atom pelindung.

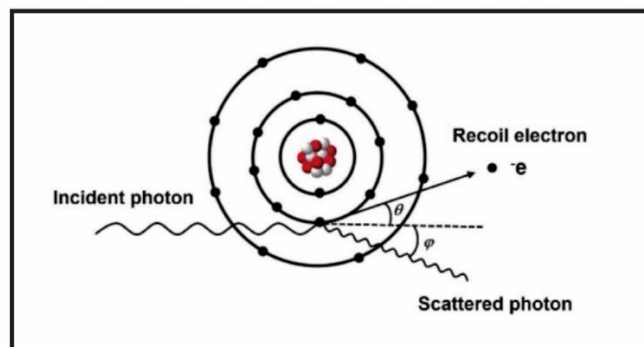


Gambar 2.2. Interaksi radiasi dengan materi (Efek Fotolistrik)

II.3.2 Hamburan compton

Dalam hamburan compton, foton yang masuk berinteraksi dengan inti target melalui hamburan tak elastis dan tidak menghilang tetapi memberikan sebagian

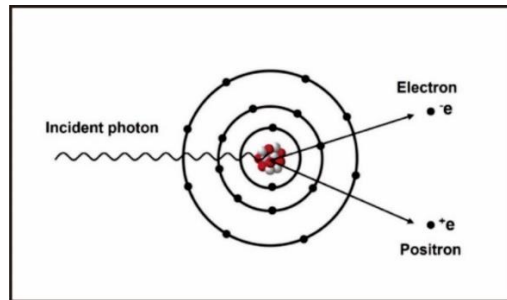
energinya kepada elektron dan terhambur dengan energi yang berkurang selama hamburan Compton sesuai yang ditunjukkan pada **gambar 2.3**. Elektron orbital menyerap sebagian energi (lebih besar dari energi ikatannya) dari foton dan terlepas dari atom sebagai elektron pantul. Hamburan Compton terutama terjadi antara 100 keV-10 MeV [30]. Efek Compton umumnya terjadi pada elektron-elektron luar inti. Foton yang terhambur masih memiliki sejumlah besar energi, melalui efek fotolistrik atau hamburan berganda, akhirnya diserap.



Gambar 2.3. Interaksi radiasi dengan materi (Hamburan Compton)

II.3.3 Produksi pasangan

Dalam produksi pasangan, ketika energi foton insiden lebih besar atau sama dengan 1,022 MeV (setara dengan dua kali massa istirahat elektron), foton berinteraksi langsung dengan inti dan menghilang, menghasilkan sepasang elektron-positron sebagaimana yang ditunjukkan pada **gambar 2.4** [31]. Sisa energi akan dikonversi menjadi energi kinetik dari elektron dan positron. Elektron dan positron yang terlepas akan melambat akibat interaksi Coulomb. Mereka secara bersamaan mengeluarkan foton *X-bremsstrahlung* melalui kehilangan radiasi dengan energi yang jauh lebih rendah dari foton masuk [32]. Setelah kehilangan sebagian besar energinya, positron bergabung kembali dengan antipartikelnya yaitu elektron untuk menghasilkan dua foton gamma dengan energi setidaknya 0,511 MeV melalui *annihilation*. Foton yang dihasilkan kemudian bergerak ke arah yang berlawanan, kira-kira pada sudut 180 untuk mempertahankan momentum linear.



Gambar 2.4. Interaksi radiasi dengan materi (Produksi Pasangan)

II.4 Parameter perisai radiasi

II.4.1 Koefisien Atenuasi Linier dan Koefisien Atenuasi Massa

Foton yang datang tidak akan tersebar tetapi akan diserap oleh bahan perisai atau menembusnya, akhirnya mencapai detektor. Penurunan intensitas sinar-X yang sempit dan monoenergetik mengikuti Hukum *Lambert-Beer*, di mana intensitas foton berkurang dalam bahan perisai melalui tiga interaksi (Efek Fotolistrik, Hamburan Compton, dan Produksi Pasangan) yang telah dijelaskan sebelumnya. Hubungan antara intensitas yang berkurang dan ketebalan bahan perisai dapat dijelaskan dengan persamaan berikut [33]:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x) \quad (2.1)$$

dimana I dan I_0 adalah intensitas foton awal dan intensitas foton setelah melewati materi, x adalah ketebalan penyerap dan μ adalah koefisien atenuasi linier.

Koefisien atenuasi linier didefinisikan sebagai jumlah penurunan intensitas radiasi sinar-X saat melewati material. Material dengan koefisien atenuasi linier yang tinggi akan lebih efektif dalam melindungi dari paparan radiasi [34]. Parameter ini dapat dihitung dengan persamaan

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln \frac{I}{I_0} \quad (2.2)$$

Koefisien atenuasi massa mengukur jumlah foton yang berinteraksi (mungkin tersebar atau diserap) dengan sampel [35]. Koefisien atenuasi massa dapat dievaluasi menggunakan Hukum *Lambert-Beer*[36], dapat dihitung kira-kira

dari jumlah tertimbang koefisien unsur-unsur penyusunnya yang diperoleh dengan membagi koefisien atenuasi dengan densitas [37]:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.3)$$

II.4.2 Half Value Layer (HVL)

HVL didefinisikan sebagai ketebalan bahan pelindung yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi awal hingga 50% setelah menembus pelindung [38]. Semakin rendah nilai HVL, material memiliki kinerja terbaik sebagai bahan pelindung radiasi [39]. HVL dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.4)$$

II.4.3 Tenth Value Layer (TVL)

Tenth Value Layer atau lapisan nilai kesepuluh didefinisikan sebagai ketebalan pelindung atau penyerap yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi awal hingga 10%, dapat dihitung oleh persamaan [40]:

$$\text{TVL} = \frac{2.302}{\mu} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.5)$$

II.4.4 Mean free path (MFP)

Mean free path atau jalur bebas rata-rata didefinisikan sebagai jarak rata-rata yang ditempuh oleh foton sebelum mengalami tindakan penyerapan atau interaksi lainnya, dapat dihitung menggunakan persamaan [41]:

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (2.6)$$

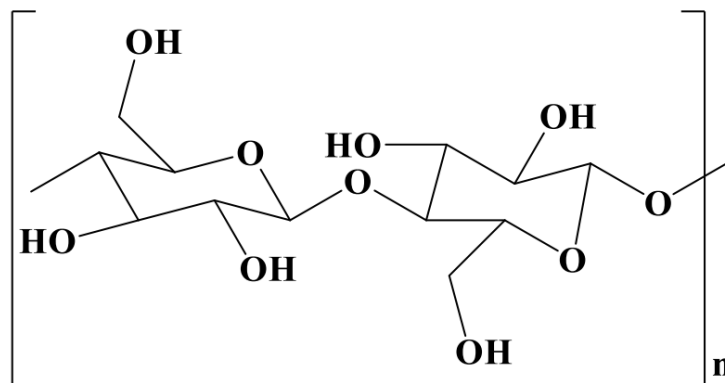
II.5 Selulosa

Selulosa terdiri dari unit glukosa anhidrat berulang yang dihubungkan secara kovalen oleh fungsi asetal yang mengandung unit berulang gugus OH

Selulosa. Gugus OH utama di sepanjang rantai makromolekul mudah dimodifikasi melalui interaksi dengan gugus fungsi, sehingga menghasilkan berbagai macam turunan Selulosa [42]. Selulosa merupakan kandidat yang baik untuk pembuatan bahan berkelanjutan karena ketersediaannya yang meluas, kemampuan terbarukan, dan kemampuan terurai [43].

II.5.1 Sumber dan Struktur Kimia Selulosa

Selulosa adalah komponen struktural penting dari dinding sel primer tumbuhan hijau, berbagai bentuk alga, dan oomycetes. Beberapa spesies bakteri mengeluarkannya untuk membentuk biofilm dan merupakan polimer organik paling melimpah di bumi. Untuk mengatasi kelemahannya adalah dengan cara melarutkannya. Selulosa adalah komponen struktural dinding sel tumbuhan hijau, diproduksi oleh alga, acetobacter, dan rhizobium, dan organisme lainnya. Diekstraksi dari bahan baku biomasnya dan mempunyai potensi menjadi sumber biofuel terbarukan yang tidak terbatas. Penekanan lebih besar diberikan pada penggunaan biopolimer dalam pengembangan produk sintetik yang ramah lingkungan dan biokompatibel [44]. Struktur kimia dari Selulosa ditunjukkan pada **gambar 2.5**



Gambar 2.5. Struktur Kimia Selulosa ($C_6H_{10}O_6$) [45]

II.5.2 Keunggulan bahan Selulosa

Kinerjanya yang luar biasa, Selulosa merupakan polimer alami yang terbarukan dan dapat terbiodegradasi. Selain itu, ia memiliki keunggulan lain, seperti kepadatan rendah, porositas tinggi, dan luas permukaan spesifik yang besar.

Dengan demikian, dapat diterapkan untuk berbagai tujuan di bidang adsorpsi dan pemisahan minyak/air, isolasi termal, dan aplikasi biomedis, serta banyak bidang lainnya [46] [47]. Selulosa alami, terutama diperoleh dari sumber bakteri dan nabati, dapat berfungsi sebagai bahan perancah berpotensi tinggi untuk berbagai tujuan regeneratif.

II.6 Bismut (III) Nitrat ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$)

Bismuth ($Z = 83$, $\rho = 9,790 \text{ g cm}^{-3}$) merupakan alternatif yang paling sesuai untuk Pb dalam aplikasi perisai radiasi yang ramah lingkungan. Bi menawarkan kemampuan perisai yang serupa dengan Pb pada massa yang sama, tetapi dengan ketebalan yang lebih tinggi karena kerapatan yang lebih rendah dibandingkan dengan Pb ($\rho = 11,340 \text{ g cm}^{-3}$) [48]. Beberapa sifat umum dari Bismut Nitrat, diantaranya [49]:

1. Kepadatan Tinggi

Bismut nitrat memiliki kepadatan yang cukup tinggi, yang dapat memberikan efek perisai yang baik terhadap radiasi. Kepadatan tinggi dapat membantu dalam menyerap atau mengurangi penetrasi radiasi.

2. Karakteristik Absorpsi Radiasi

Bismut memiliki sifat menyerap radiasi dengan baik, terutama pada energi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, senyawa seperti bismut nitrat dapat digunakan untuk memperkuat kemampuan perisai radiasi.

3. Toleransi terhadap tekanan dan temperatur Tinggi

Beberapa senyawa bismut memiliki toleransi terhadap tekanan dan suhu tinggi, yang mungkin penting dalam lingkungan di mana perisai radiasi digunakan.

4. Kemampuan Modifikasi

Sifat-sifat bismut nitrat dan senyawa bismut lainnya dapat dimodifikasi untuk memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu, termasuk dalam pengembangan bahan perisai radiasi yang lebih efektif.

II.7 Tungsten (W)

Tungsten ($Z = 74$) adalah alternatif potensial lain yang tidak beracun untuk Pb meskipun nilai μ/ρ -nya sedikit lebih rendah daripada Pb. Berkat kerapatan tinggi ($\rho = 19,250 \text{ g cm}^{-3}$), mungkin untuk mencapai atenuasi yang sama seperti perisai Pb pada ketebalan yang serupa. Titik leleh tinggi yaitu sekitar $3422 \text{ }^\circ\text{C}$, tekanan uap rendah di atas $1650 \text{ }^\circ\text{C}$, dan sifat mekanis yang menguntungkan membuatnya menjadi pengisi ideal untuk mengembangkan komposit polimer multi-fungsi. Selain tungsten logam (W), senyawa seperti tungsten (III) oksida (WO_3), tungsten karbida (WC), borida tungsten (WB, WB_2), natrium tungsten (Na_2WO_4), nitrida tungsten besi, dan nanopartikel masing-masing telah banyak dijelajahi untuk perisai radiasi[50][51]

Alavian dkk. menggunakan simulasi Monte Carlo untuk mempelajari karakteristik redaman radiasi dari komposit LDPE yang diisi dengan partikel W dalam ukuran beragam, yaitu 100 mikrometer, 10 mikrometer, 1 mikrometer, dan 100 nanometer dalam rentang energi yang luas (0,015 hingga 15 MeV). Mereka mengamati peningkatan redaman dengan penurunan ukuran partikel W, yang lebih signifikan dengan proporsi pengisi yang lebih rendah [52]