

TESIS

**SIFAT STRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI APRON BERBASIS
COMPOSIT PVA/BISMUTH(III) NITRAT SEBAGAI BAHAN
PELINDUNG SINAR-X**

FAHRUL BAKRI

H032221013



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

**SIFAT STRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI APRON BERBASIS
COMPOSIT PVA/BISMUTH(III) NITRAT SEBAGAI BAHAN
PELINDUNG SINAR-X**

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***

**FAHRUL BAKRI
H032221013**

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

2023

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**SIFAT STRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI APRON BERBASIS
COMPOSIT PVA/BISMUTH(III) NITRAT SEBAGAI BAHAN
PELINDUNG SINAR-X**

Disusun dan diajukan oleh

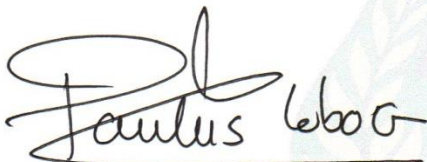
FAHRUL BAKRI

H032221013

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

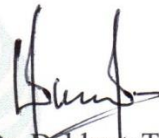
Menyetujui

Penasehat Utama,



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

Penasehat Pendamping,



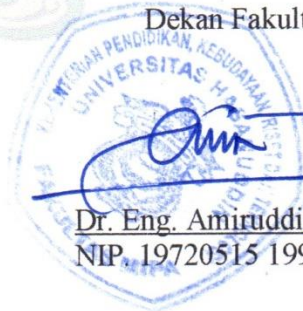
Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si
NIP. 19750907 200003 1 006

Ketua Program Studi,



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

Dekan Fakultas,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fahrul Bakri
NIM : H032221013
Program Studi : Fisika
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

SIFAT STRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI APRON BERBASIS COMPOSIT PVA/BISMUTH(III) NITRAT SEBAGAI BAHAN PELINDUNG SINAR-X

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, 15 November 2022

Yang Menyatakan



Fahrul Bakri

ABSTRAK

Apron berbasis timbal karet banyak digunakan di lingkungan pencitraan medis untuk mengurangi paparan radiasi pengion kepada karyawan, pasien, dan perawat. Penelitian tentang apron perisai sinar-X dengan mengurangi penggunaan timbal (Pb) yang memiliki sifat toxic, berat, dan kekakuan yang tinggi dilakukan dengan membuat apron berbasis Polivinil Alkohol sebagai matriks dan Bismuth (III) Nitrat sebagai isiannya. Pembuatan Apron dilakukan dengan menggunakan metode pencampuran PVA dan $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ dengan penambahan konsentrasi $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ sebesar 10, 20, 30, dan 40 %wt yang selanjutnya masing-masing diberikan kode sampel Bi10, Bi20, Bi30, dan Bi40. Sampel Apron kemudian dilakukan pengujian ukuran kristal, gugus fungsi, efektifitas, dan sifat mekanik. Ukuran kristal yang tertinggi pada Bi40 sebesar 37,881 nm. Ikatan kimia dan gugus fungsi yang terbentuk pada sampel Apron berbasis PVA/ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ adalah O-H, C-H, O=C=O, C=O, NO_3^- dan Bi-O-Bi. Efektifitas dari sampel Apron dihitung dari nilai parameter shieldingnya. Nilai Linier Attenuation Coefficient (LAC) yang paling tinggi adalah Bi40 sebesar $17,398 \text{ cm}^{-1}$, nilai Massa Attenuation Coefficient (MAC) yang paling tinggi adalah Bi40 sebesar $9,719 \text{ cm}^2/\text{g}$, nilai Half Value Layer (HVL) terendah adalah Bi40 sebesar 0,039 cm, nilai Tenth Value Layer (TVL) terendah sebesar 0,132 cm, dan nilai Effective Atomic Number (Z_{eff}) yang tertinggi adalah Bi40 sebesar 10,943. Nilai kuat tarik dan kuat mulur paling besar yaitu Bi30 sebesar $3,888 \text{ N/mm}^2$ dan 18,445 %. Sedangkan nilai Modulus Young paling besar adalah Bi40 sebesar $0,304 \text{ N/mm}^2$ sedangkan sampel Apron dengan Modulus Young paling kecil adalah Bi20 sebesar $0,112 \text{ N/mm}^2$.

Kata kunci: Pelindung Radiasi, Apron, Polymer, Bismuth (III) Nitrat, Sinar-X

ABSTRACT

Lead rubber based aprons are widely used in medical imaging environments to reduce ionizing radiation exposure to employees, patients, and caregivers. Research on X-ray shielding aprons by reducing the use of lead (Pb), which has toxic, heavy, and high stiffness properties, was conducted by making an apron based on polyvinyl alcohol as the matrix and Bismuth (III) Nitrate as the filler. Apron manufacturing was carried out using the PVA and $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ mixing method with different $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ additions of 10, 20, 30, and 40% wt, and then each sample was given the sample code Bi10, Bi20, Bi30, and Bi40. Apron samples were then tested for crystal size, functional groups, effectiveness, and mechanical properties. The highest crystal size in Bi40 was 37.881 nm. Chemical bonds and functional groups formed in the PVA/ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ based Apron sample are O-H, C-H, O=C=O, C=O, NO_3^- , and Bi-O-Bi. The effectiveness of the Apron sample is calculated from the shielding parameter values. The highest Linear Attenuation Coefficient (LAC) value was Bi40 at 17.398 cm^{-1} , the highest Mass Attenuation Coefficient (MAC) value was Bi40 at $9.719 \text{ cm}^2/\text{g}$, the lowest Half Value Layer (HVL) value was Bi40 at 0.039 cm, the lowest Tenth Value Layer (TVL) value was 0.132 cm, and the highest Effective Atomic Number (Z_{eff}) value was Bi40 at 10.943. The highest tensile strength and creep strength values are Bi30 at 3.888 N/mm^2 and 18.445%. While the largest Young's modulus value is Bi40 at 0.304 N/mm^2 , the Apron sample with the smallest Young's modulus is Bi20 at 0.112 N/mm^2 .

Keywords: Radiation Shielding, Apron, Polymer, Bismuth(III) Nitrate, X-rays

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah Rabbil Alamin, segala puji bagi Allah SWT atas segala macam rezeki, rahmat, ridho dan karunia yang telah dilimpahkan. Dan tidak lupa kita kirimkan salam dan sholawat kepada junjungan baginda Nabi Muhammad SAW, Nabi yang menjadi suri tauladan dan rahmat bagi alam semesta. Untuk itu penulis sangat bersyukur atas kesempatan, kemampuan dan kesehatan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul :“**SIFAT STRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI APRON BERBASIS COMPOSIT PVA/BISMUTH(III) NITRAT SEBAGAI BAHAN PELINDUNG SINAR-X**”, yang merupakan tugas akhir untuk melengkapi persyaratan mencapai gelar Magister Fisika pada Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Dalam tulisan ini, penulis menyadari bahwa penyelesaian tesis ini tidak lepas dari bimbingan, bantuan, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini, izinkan penulis menghanturkan ucapan terima kasih yang tak terhingga khususnya kepada kedua orang tua penulis, Ayahanda **Asri** & Ibunda **Sitti Rahma**, atas do'a yang tak henti-hentinya. Kepada sang Istri **Riski**, dan putra pertama saya **Muhammad Alfatih** yang penuh dengan kesabaran dan do'a yang dipanjatkan. Tak lupa pula kepada saudara dan saudari **Irma Esi** dan **Muhammad Alfauzi**, yang selalu memberi motivasi dan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis juga ingin menyampaikan penghormatan dan rasa terima kasih yang tulus serta penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak **Prof. Dr. Arifin, MT** selaku Ketua Departemen dan Ibu **Dr. Sri Dewi Astuty, S.Si., M.Si** sebagai sekretaris Departemen Fisika Fakultas MIPA Unhas.

2. **Bapak Prof. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.,** selaku Penasehat Utama yang telah banyak meluangkan waktu dan pikirannya serta memberi motivasi, masukan dan arahannya dalam penyusunan tesis ini.
3. **Bapak Prof. Dahlang Tahir, M.Si.,** selaku Penasehat Pertama sekaligus yang telah banyak memberi masukan, arahan serta meluangkan waktu dan pikirannya dalam penyelesaian tesis ini. Sekali lagi terima kasih atas jasa dan kesabarannya membimbing kami.
4. **Bapak Prof. Dr. Tasrief Surungan, M.Sc., Ibu Prof. Dr. Sri Suryani, DEA., dan Ibu Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, MT.,** selaku penguji yang telah banyak memberi masukan, saran serta kritiknya demi penyempurnaan tesis ini.
5. Teman-teman kuliah baik itu dari jenjang sarjana hingga doctor, **Ardi, Syarif, Azlan, Syahrul, Inayah, Uswa, Itto, Reni, Febri, Nita, Ola, Nunu, Asdar, Kak Ime,** dan **Ninda.** Belajar dan bekerja bersama kalian sangat menyenangkan, waktunya singkat tapi suka dukanya begitu banyak untuk diceritakan. Terima kasih atas support dan waktu-waktunya semoga kalian menjadi orang-orang yang hebat.
6. Dosen-dosen pengajar yang telah membagikan ilmunya serta memberi bimbingan moril selama perkuliahan.
7. Staf pegawai baik itu di Departemen Fisika maupun dari Fakultas yang telah banyak membantu.
8. Dan semua pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak memberi bantuan dan kemudahan dalam proses penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini sangat jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan berbagai kritik dan saran yang bersifat membangun demi kebaikan tesis ini dan tentunya juga buat kebaikan penulis sendiri.

Akhir kata, semoga Allah SWT memberikan segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung kepadapenulis. Dan penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna

terkhusus bagi penulis dan pihak–pihak terkait pada umumnya. Semoga Allah senantiasa melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya. Amin.

Makassar, November 2023

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAAN	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Polivinil Alkohol	3
2.1.1 Sifat-sifat Kimia dan Fisik PVA	3
2.2 Bismuth(III) Nitrat	4
2.3 Sinar-X	4
2.3.1 Proses Interaksi Sinar-X Dengan Materi	6
2.3.2 Jenis Interaksi Sinar-X dengan Materi	6
2.3.3 Efek Radiasi Sinar-X	10
2.3.4 Alat Proteksi Radiasi	11
2.3.5 Parameter Pelindung Radiasi	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	15
3.2.1 Alat Penelitian	15
3.2.2 Bahan Penelitian	15
3.3 Prosedur Penelitian	16

3.3.1 Pembuatan Sampel	16
3.3.2 Karakteristik	16
3.4 Bagan Alir Penelitian	17
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Uji X-ray Diffraction (XRD)	18
4.2 Uji Fourier Transform Infrared (FT-IR)	20
4.3 Parameter Shielding Apron berbasis PVA/Bi(NO ₃) ₃	21
4.4 Sifat Mekanik Bahan Apron berbasis PVA/Bi(NO ₃) ₃	26
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	28
5.2 Saran	29
Daftar Pustaka	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur polivinil alcohol.....	3
Gambar 2.2. Efek Foto Listrik	7
Gambar 2.3. Efek Compton	9
Gambar 2.4. Produksi Pasangan	10
Gambar 3.1. Bagan Alir Penelitian	17
Gambar 4.1. Hasil XRD sampel Apron PVA/Bi(NO ₃) ₃	18
Gambar 4.2. Hasil pengukuran sifat struktur a) ukuran kristal dan b) strain sampel Apron.....	20
Gambar 4.3. Hasil uji FTIR sampel apron berbasis PVA/Bi(NO ₃) ₃	21
Gambar 4.4. Kepadatan sampel apron berbasis PVA/Bi(NO ₃) ₃	22
Gambar 4.5. Parameter shielding sampel apron pada energy 80 KVp. a. <i>Linier Attenuation Coefficient</i> (LAC) b. <i>Massa Attenuation Coefficient</i> (MAC)	22
Gambar 4.6. Nilai <i>Half Value Layer</i> dan <i>Tenth Value Layer</i> sampel apron pada energy 80 kVp	23
Gambar 4.7. Nilai <i>Effective Atomic Number</i> (Z_{eff}) sampel apron Bi10, Bi20, Bi30 dan Bi40 pada energy 80 kVp	24
Gambar 4.8. Perbandingan apron PVA/Bi(NO ₃) ₃ dengan penelitian lainnya	25
Gambar 4.9. a. Kuat tarik dan <i>elongation</i> . b. Modulus Young	27

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persentasi Berat dari PVA dan $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$	16
Tabel 2. Nilai parameter shielding dari bahan Apron penelitian lainnya.....	25

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan radiasi pengion sinar-X telah digunakan di banyak bidang, termasuk pembangkit listrik tenaga nuklir, kedokteran nuklir, pencitraan radiologi, pusat penelitian, dan industri modern [1]. Baik masyarakat umum maupun pengguna terkait radiasi sangat mengkhawatirkan tentang risiko kesehatan yang signifikan yang disebabkan oleh paparan sinar-X yang berlebihan [2].

Alat pelindung diri seperti apron sangat penting untuk mengurangi paparan radiasi. Apron berbasis timbal-karet banyak digunakan di lingkungan pencitraan medis untuk mengurangi paparan radiasi pengion kepada karyawan, pasien, dan perawat [3]. Karena kemampuannya yang luar biasa untuk melindungi tubuh dari radiasi, apron berbahan lembaran timbal (Pb) dianggap ideal untuk berbagai jenis perlindungan. Namun, karena beratnya yang besar, toksisitasnya yang tinggi, kurang fleksibel, dan tidak ramah lingkungan, sehingga penggunaan apron ini semakin dibatasi [4][5].

Penelitian terbaru tentang perisai sinar-X untuk diagnosis medis terutama berfokus pada mengurangi berat pakaian pelindung dan menghasilkan kain yang lebih banyak dan dapat melindungi radiasi [6]. Selain itu, penelitian telah menunjukkan bahwa radiasi non-Pb, ringan, dan efektif pakaian pelindung dengan nomor atom Z yang tinggi, terutama timbal (Pb), bismut (Bi), tungsten (W), dan barium (Ba), dapat digunakan sebagai isian bahan pelindung untuk membentuk komposit yang terdiri dari berbagai jenis polimer [7]. Polimer dipilih sebagai matriks karena mereka dapat melindungi dengan sangat baik, ringan, mudah disiapkan, dan mudah didesain [8][9].

Dalam aplikasi perlindungan radiasi, komposit polimer memiliki banyak keunggulan, termasuk fleksibilitas, kemampuan kerja, stabilitas kimia, dan biaya rendah [10]. Selain itu, penelitian telah dilakukan untuk membuat bahan

pelindung yang ramah lingkungan dengan menggunakan bismut, tungsten, dan barium sulfat (BaSO_4) [11].

Karena nomor atom dan densitas (ρ) yang tinggi dari atom Bi, penambahan bismuth dapat meningkatkan redaman sinar X. Ini disebabkan oleh kemungkinan interaksi foton dan transfer energi antara sampel sinar-X yang lebih besar dan insiden sinar-X yang sama [12].

Beberapa penelitian telah dilaporkan tentang pelindung radiasi dengan menggunakan PVA sebagai matriks dan Bi_2O_3 sebagai isian dengan efektivitas pelindung radiasi yang baik [13][14][15]. Pada Penelitian ini akan dilakukan pengujian kemampuan perlindungan sinar-X dan sifat struktur dari apron yang dibuat berbasis PVA dengan penambahan Bismuth (III) Nitrate sebagai isian. Kandungan Bismuth bervariasi yaitu 10%, 20%, 30%, dan 40%. Pengujian dilakukan dengan menggunakan X-ray diffraction (XRD) untuk ukuran kristal, active functional groups menggunakan Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), kemampuan pelindung dari sinar-X, dan sifat mekanik untuk kuat tarik dan elastisitas bahan Apron.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini yang menjadi rumusan masalah meliputi :

1. Bagaimana ukuran kristal dan sifat mekanik bahan pelindung radiasi sinar-X berbasis komposit PVA dan Bismuth (III) Nitrate?
2. Bagaimana gugus fungsi yang terbentuk dan parameter radiasi pada bahan pelindung radiasi sinar-X berbasis komposit PVA dan Bismuth (III) Nitrate?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

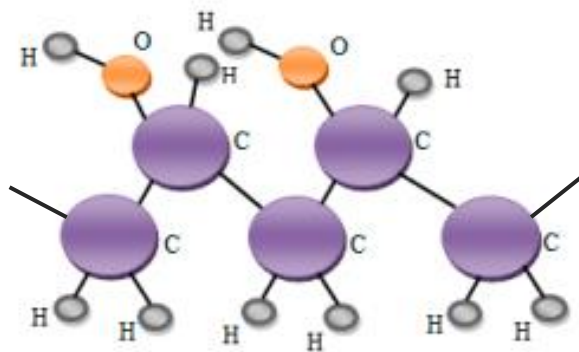
1. Menganalisis ukuran kristal dan sifat mekanik bahan pelindung radiasi sinar-X berbasis komposit PVA dan Bismuth (III) Nitrate.
2. Menganalisis gugus fungsi yang terbentuk dan parameter radiasi pada bahan pelindung radiasi sinar-X berbasis komposit PVA dan Bismuth (III) Nitrate.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polivinil Alkohol (PVA)

Polimer PVA yang memiliki rumus molekul $[\text{CH}_2\text{-CH}(\text{OH})-\text{}]_n$, adalah polimer buatan yang dapat diubah menjadi gel polimer. Polimer ini bergabung dengan jaringan molekul makro dengan sifat unik. Saat ini, perhatian khusus telah dilakukan pada rangsangan dan respons gel; mereka dapat berubah secara signifikan hanya dengan perubahan kecil pada kondisi lingkungannya. Ini menunjukkan bahwa perubahan keadaan gel dapat dikontrol oleh kuantitas kimia dan fisika seperti pH, garam, cahaya tampak, dan medan listrik [16].



Gambar 2.1. Struktur polivinil alkohol [17].

2.1.1 Sifat-sifat Kimia dan Fisik PVA

Tingkat PVA dan berat molekulnya ditentukan oleh persentase hidrolisis, yang menentukan sifat kimia dan fisik PVA [18]. Keunggulan karakteristik polimer PVA, terutama pembentuk lapisan, pembentuk gel, sifat fisik, hydrophilicity yang tinggi, kemampuan proses yang baik, biocompatibility, dan daya tahan kimia yang baik, menjadikannya subjek penelitian khusus [19]. Selain itu, poli(vinil alkohol) (PVA) adalah salah satu jenis polimer hidrofilik yang tidak toksis. PVA dipolimerisasi melalui pemanasan, menghasilkan gel yang jika dikeringkan pada suhu kamar menghasilkan film transparan. Di dalam air panas lebih dari 80°C, PVA larut dalam air dengan batas konsentrasi kurang dari 20 %

(b/v). Namun dalam air, film ini dapat mengembang kembali menjadi gel yang rapuh [20]. Dibandingkan dengan polimer lain yang dikenal, PVA memiliki kekuatan, fleksibilitas, kekerasan, dan sifat penghalang gas yang luar biasa. Namun, untuk mencegah penurunan permeabilitas gasnya, PVA harus dilindungi dari kelembaban [21].

2.2 Bismuth (III) Nitrat

Bismut (III) nitrat merupakan jenis garam bismut yang terdiri daripada ion Bismut (III) dan ion nitrat dengan formula kimia $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ [22]. Bismut (III) nitrat sekarang tersedia secara komersial dengan biaya yang relatif rendah [23]. Dengan massa atom 208,980, bismut adalah unsur stabil terberat di tabel periodik. Ini adalah unsur ke-83 di tabel periodik. Bismut, yang memiliki peringkat 64 di kelimpahan kerak bumi, diproduksi dalam jumlah besar setiap tahun sebagai produk sampingan dari pemurnian tembaga dan timah. Ini adalah unsur yang relatif langka. Karena bismut tidak beracun dan tidak bersifat karsinogenik, terlepas dari statusnya sebagai logam berat, dianggap aman [24].

2.3 Sinar-X

Sinar-X ditemukan pertama kali oleh Roentgen pada tahun 1895. Pada saat ditemukan, sifat-sifat sinar-X tidak langsung dapat diketahui. Sifat-sifat alamiah sinar-X baru secara pasti ditentukan pada tahun 1912 seiring dengan penemuan difraksi sinar-X oleh kristal. Sinar-X bersifat heterogen, panjang gelombangnya bervariasi dan tidak terlihat. Perbedaan sinar-X dengan sinar elektromagnetik lainnya terletak pada panjang gelombang, dimana panjang gelombang sinar-X sangat pendek, yaitu hanya $1/10.000$ panjang gelombang cahaya yang terlihat. Panjang gelombang yang pendek tersebut membuat sinar-X mampu menembus benda-benda yang dilaluinya [25].

Jenis radiasi sinar-X mempunyai kemiripan dengan radiasi sinar γ , yaitu dalam hal daya jangkau pada suatu media dan pengaruhnya oleh medan listrik. Yang membedakan antara keduanya adalah proses terjadinya. Radiasi γ

dihasilkan dari proses peluruhan zat radioaktif yang terjadi pada inti atom, sedangkan sinar-X dihasilkan pada waktu elektron berenergi tinggi yang menumbuk suatu target logam. Sinar γ akan dipancarkan secara terus menerus oleh sumber radioaktif selama sumber tersebut bersifat tidak stabil, sedangkan sinar-X dapat setiap saat dihentikan pancarannya apabila pesawat sinar-X tidak diberikan suplai daya (tenaga listrik) [26]. Sinar-X memiliki beberapa sifat fisik sebagai berikut [27].

a. Daya Tembus

Sinar-X mempunyai daya tembus yang besar, dapat menembus bahan yang padat dengan daya tembus yang sangat besar seperti tulang dan gigi. Daya tembus sinar-X berbanding lurus dengan tegangan tabung, semakin tinggi nilai tegangan tabung (kV) yang digunakan maka semakin besar pula daya tembus sinar-X.

b. Pertebaran

Sinar-X setelah melalui suatu bahan, berkas sinar-X akan bertebaran ke seluruh arah yang akan menimbulkan radiasi hambur pada bahan yang dilalui. Hal ini mengakibatkan gambar pada radiografi dan pada film akan tampak terlihat kabur secara menyeluruh. Untuk mengurangi akibat dari radiasi hambur maka digunakan timah hitam (grid) yang tipis diantara subjek.

c. Penyerapan

Sinar-X dalam radiografi akan diserap oleh bahan sesuai dengan kepadatan bahan tersebut. Penyerapan sinar-X akan semakin besar apabila kepadatan bahan semakin tinggi.

d. Efek fotografik

Dalam kamar gelap, sinar-X dapat menghitamkan emulsi film setelah diproses secara kimiawi.

e. Fluoresensi

Sinar-X dapat menyebabkan bahan-bahan tertentu (kalsium atau sink sulfide) memancarkan cahaya (luminisensi). Terdapat 2 (dua) jenis luminisensi

- 1) Fluoresensi, terjadi pemendarkan cahaya sewaktu sinar-X ada
 - 2) Fosforisensi, terjadi pemendaran cahaya berlangsung beberapa saat walaupun radiasi dari sinar-X sudah dimatikan.
- f. Ionisasi
- Efek primer dari sinar-X apabila mengenai suatu bahan akan menimbulkan ionisasi dari partikel atau zat tersebut.
- g. Efek biologi
- Sinar-X memberikan efek perubahan biologi pada jaringan tubuh. Efek biologi ini dipergunakan dalam pengobatan radiologi.

2.3.1 Proses Interaksi Sinar-X Dengan Materi

Interaksi sinar-X dengan materi terjadi bila sinar-X ditembakkan dan mengenai suatu bahan. Sinar-X yang ditembakkan mempunyai energi yang lebih tinggi sehingga mampu mengeksitasi elektron-elektron di dalam atom sasarannya. Ketika sinar-X menumbuk bahan, ada bagian yang diteruskan, diserap, dan dihamburkan. Pada saat foton mengenai suatu materi maka akan terjadi interaksi yang mengakibatkan penyerapan dan penghamburan foton. Proses penyerapan dan penghamburan akan berpengaruh pada pelemahan atau attenuasi dari foton tersebut yang disebabkan oleh kerapatan, ketebalan dan nomor atom bahan yang dilaluinya. Interaksi sinar-X dengan materi akan terjadi bila sinar-X yang dipancarkan dari tabung dikenakan pada suatu objek. Sinar-X yang terpancar merupakan panjang gelombang elektromagnetik dengan energi yang cukup besar. Foton ini tidak bermuatan listrik, dan merambat menurut garis lurus. Interaksi ini menyebabkan foton akan kehilangan energi yang dimiliki oleh foton. Besarnya energi yang diserap tiap satuan massa dinyatakan sebagai satuan dosis serap atau Gray. Dalam jaringan tubuh manusia, dosis serap diartikan sebagai adanya 1 Joule energy radiasi yang diserap 1 kg jaringan tubuh [28].

2.3.2 Jenis Interaksi Sinar-X dengan Materi

Sinar-X merupakan radiasi elektromagnet yang membawa energi dalam bentuk paket-paket yang disebut foton. Sinar-X memiliki panjang gelombang yang sangat pendek, sekitar 10^{-8} - 10^{-9} meter. Semakin tinggi energinya maka

semakin pendek panjang gelombangnya. Sinar-X dengan energi rendah cenderung berinteraksi dengan elektron dan energi tinggi cenderung berinteraksi dengan inti atom.

Dalam imaging diagnostik ada tiga mekanisme interaksi sinar-X yaitu: efek fotolistrik, efek compton, dan produksi pasangan.

a. Efek Foto Listrik

Efek foto listrik terjadi apabila sinar-X yang mengenai elektron pada kulit terdalam terjadi ionisasi dan juga terjadi absorpsi. Sinar-X tersebut tidak terjadi hamburan sinar-X karena semua energinya telah diserap.

Energi yang terlepas dari kulit atom disebut foto elektron, dimana mempunyai energi kinetik yang besarnya adalah selisih dari energi ikat elektron dan energi awal dari sinar-X. Secara matematika dapat dirumuskan sebagai berikut:

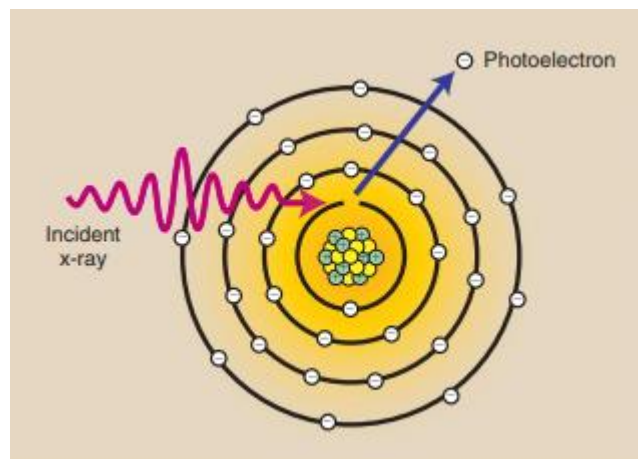
$$E_i = E_b + E_{ke} \quad (2.1)$$

Dimana:

E_i : energi awal sinar-X

E_b : energi ikat elektron

E_{ke} : energi kinetik dari elektron [29].



Gambar 2.2. Efek Foto Listrik [29].

b. Efek Compton

Sinar-X yang berinteraksi dengan bahan, mengenai elektron pada kulit terluar tidak hanya menghasilkan hamburan sinar-X tetapi juga terjadi pengurangan energi dan ionisasi atom target. Interaksi ini disebut efek Compton atau hamburan Compton.

Sinar-X yang mengenai elektron pada kulit terluar akan mengeluarkan elektron tersebut dan mengionisasi atom target. Elektron yang dipancarkan itu disebut elektron Compton atau elektron skunder. Sinar-X terus berjalan setelah mengenai elektron namun dengan arah yang berbeda dan energinya lebih rendah daripada energi sinar-X datang.

Energi sinar-X datang sebanding dengan energi hamburan Compton dan energi dari elektron yang terlepas. Energi elektron yang terlepas sebanding dengan energi ikat dan energi kinetik elektron saat meninggalkan kulitnya. Secara matematika dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_i = E_s + (E_b + E_{ke}) \quad (2.2)$$

Dimana:

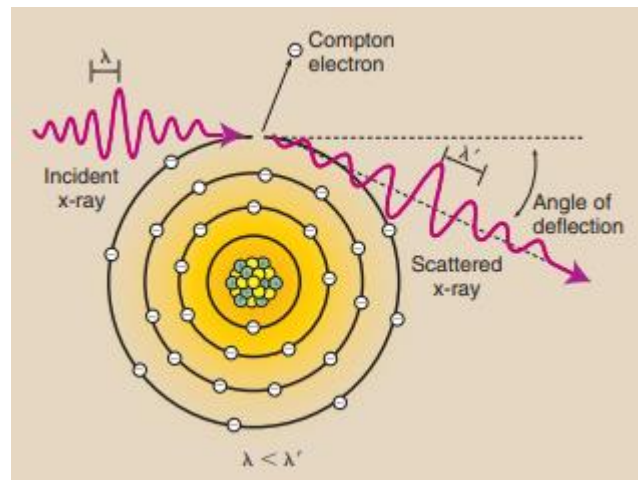
E_i : energi sinar-X datang

E_s : energi hamburan sinar-X

E_b : energi ikat elektron

E_{ke} : energi kinetik dari elektron

Hamburan Compton dapat mengurangi kontras dalam hasil radiografi. Apabila suatu hasil radiografi terkena hamburan Compton maka akan banyak terjadi fog, densitasnya sama sehingga akan mengurangi nilai kontras [29].

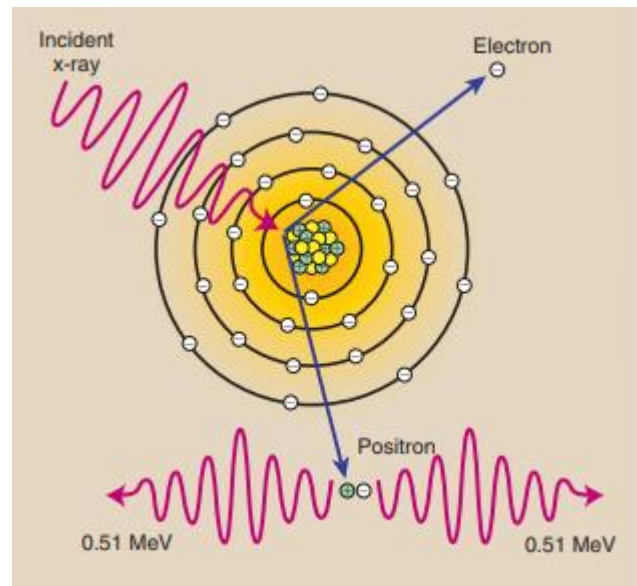


Gambar 2.3. Efek Compton [29].

c. Produksi Pasangan

Proses ini hanya dapat terjadi pada medan listrik disekitar partikel bermuatan, terutama dalam medan sekitar inti. Interaksi antara sinar-X dan medan listrik inti atom menyebabkan sinar-X menghilang dan menyebabkan dua elektron tampak. Elektron satu merupakan elektron positif dan elektron yang satu merupakan elektron negatif. Proses ini disebut produksi pasangan.

Produksi pasangan ini terjadi apabila energinya lebih dari 1,02 MeV maka produksi pasangan ini tidak penting dalam pencitraan diagnostik, tetapi digunakan dalam pencitraan radioisotop dalam kedokteran nuklir [29].



Gambar 2.4. Produksi Pasangan [29].

2.3.3 Efek Radiasi Sinar-X

Efek radiasi sinar-X berdasarkan jumlah dosis yang diterima dapat dibedakan menjadi [30].

1. Dosis Berlebihan

Penerimaan dosis yang berlebih dapat menimbulkan efek radiasi sebagai berikut

a. Efek Stokastik

Efek stokastik muncul tanpa dipengaruhi oleh ambang batas dosis radiasi dan tidak dapat diprediksi. Peluang muncul efek stokastik berbanding lurus dengan besar dosis radiasi yang diterima pasien. Contoh dari efek stokastik adalah cacat genetik, kanker, dan kelainan herediter.

b. Efek Deterministik

Efek deterministik muncul dipengaruhi oleh ambang batas dosis radiasi dan tidak berakibat fatal. Contoh dari efek deterministik adalah kemandulan, kematian janin, katarak dan kesakitan radiasi (mual, muntah, diare).

2. Dosis Kecil

Efek radiasi sinar-X berdasarkan waktu paparannya dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu

a. Paparan dengan waktu singkat (akut)

Paparan atau penyinaran dalam waktu singkat terjadi biasanya secara tidak sengaja (kecelakaan radiasi). Paparan ini dapat memberikan efek biologis secara langsung apabila dalam dosis yang tinggi. Efek biologi akan muncul kurang dari satu tahun sejak terkena paparan.

b. Paparan dengan waktu terus-menerus

Paparan ini biasanya terjadi pada pasien terapi. Efek yang ditimbulkan muncul tidak seketika akibat paparan dengan dosis rendah secara terus menerus disebut efek tertunda.

2.3.4 Alat Proteksi Radiasi

Dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2011, diatur bahwa alat proteksi radiasi bagi pekerja radiasi meliputi: apron Pb (Timbal), tabir radiasi yang dilapisi Pb, kacamata Pb, sarung tangan Pb, pelindung tiroid Pb, pelindung ovarium dan/atau pelindung gonad [31].

a. Apron

Apron yang setara dengan 0,2 mm (nol koma dua milimeter) Pb, atau 0,25 mm (nol koma duapuluh lima milimeter) Pb untuk Penggunaan pesawat sinar-X Radiologi Diagnostik, dan 0,35 mm (nol koma tiga puluh lima milimeter) Pb, atau 0,5 mm (nol koma lima milimeter) Pb untuk pesawat sinar-X Radiologi Intervensional. Tebal kesetaran timah hitam harus diberi tanda secara permanen dan jelas pada apron tersebut.

b. Pelindung Gonad

Pelindung gonad yang setara dengan 0,2 mm (nol koma dua milimeter) Pb, atau 0,25 mm (nol koma duapuluh lima milimeter) Pb untuk Penggunaan pesawat sinar-X Radiologi Diagnostik, dan 0,35 mm (nol koma tiga puluh lima milimeter) Pb, atau 0,5 mm (nol koma lima milimeter) Pb untuk

pesawat sinar-X Radiologi Intervensional. Tebal kesetaran Pb harus diberi tanda secara permanen dan jelas pada apron tersebut. Proteksi ini harus dengan ukuran dan bentuk yang sesuai untuk mencegah gonad secara keseluruhan dari paparan berkas utama.

c. Pelindung Tiroid

Pelindung tiroid yang terbuat dari bahan yang setara dengan 1 mm (satu milimeter) Pb.

d. Sarung Tangan

Sarung tangan proteksi yang digunakan untuk fluoroskopi harus memberikan kesetaraan atenuasi paling kurang 0,25 mm (nol koma dua puluh lima milimeter) Pb pada 150 kVp (seratus lima puluh kilovoltage peak). Proteksi ini harus dapat melindungi secara keseluruhan, mencakup jari dan pergelangan tangan.

e. Kaca Mata

Kaca mata yang terbuat dari bahan yang setara dengan 1 mm (satu milimeter) Pb.

f. Tabir

Tabir yang digunakan oleh Radiografer harus dilapisi dengan bahan yang setara dengan 1 mm (satu milimeter) Pb. Ukuran tabir adalah sebagai berikut: tinggi 2 m (dua meter), dan lebar 1 m (satu meter), yang dilengkapi dengan kaca intip Pb yang setara dengan 1 mm (satu milimeter) Pb.

2.3.5 Parameter Pelindung Radiasi

a. *Linier Attenuation Coefitient* (LAC)

Intensitas sinar foton mono-energetik yang menumbuk bahan target berkurang secara eksponensial dengan jarak yang ditempuh karena interaksi antara sinar yang masuk dan material. Penurunan ini adalah diekspresikan oleh hukum Beer-Lambert

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

di mana I dan I_0 adalah intensitas sinar yang masuk dan yang ditransmisikan, masing-masing, x dan ρ mewakili ketebalan dan densitas target, dan μ adalah koefisien atenuasi linier [32].

b. *Massa Attenuation Koefisien (MAC)*

Koefisien atenuasi massa (MAC, μ_m) dari penyerap dihitung dari nilai μ dibagi dengan densitas penyerap dan dinyatakan dalam cm^2/g . MAC (μ/ρ) digunakan untuk menggambarkan penetrasi sinar-X dan interaksi dengan bahan dan secara teoritis dapat dihitung dengan menggunakan aturan campuran [33].

$$MAC = \mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2.4)$$

di mana $(\mu/\rho)_i$ adalah koefisien atenuasi massa dari unsur ke- i elemen dan w_i adalah fraksi berat elemen penyusun ke- i dalam sampel apron.

c. *Half value layer (HVL) dan Tenth value layer (TVL)*

Ketebalan lapisan nilai setengah (HVL) dan ketebalan lapisan nilai kesepuluh (TVL) didefinisikan sebagai ketebalan attenuator yang mengurangi kerapatan foton menjadi setengah dan 10 dari intensitas awalnya, masing-masing. Kuantitas HVL dan TVL telah ditentukan oleh koefisien atenuasi linier dengan menggunakan hubungan

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.5)$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.6)$$

HVL dan TVL bergantung pada komposisi dan densitas material [34].

d. *Effective atomic number (Z_{eff})*

Z_{eff} mendefinisikan perilaku kimia dari bahan komposit dengan cara yang sama seperti Z lakukan untuk unsur kimia murni. Z_{eff} dapat digunakan untuk

mengukur tingkat interaksi foton. Z_{eff} dihitung melalui persamaan berikut ini [35][36].

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_i \left(\frac{f_i A_i}{Z_i}\right) \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i} \quad (2.7)$$

dimana μ/ρ adalah *massa atenuation coefficient* .