

Radiation Protection

A detailed illustration of a male scientist in a white lab coat, green safety glasses, and green gloves, working in a laboratory. He is holding a large, thick book or document. In the background, there are various radiation safety posters on the wall, including one titled 'Radiation' with a world map, another with a radiation symbol and text about handling, and a third with three radiation symbols and text about safety. There are also stacks of papers and a roll of white material on the table.

PROTEKSI RADIASI

(RADIATION PROTECTION)

PROTEKSI RADIASI

(*RADIATION PROTECTION*)

Juliana Sidauruk, M.Si.



PROTEKSI RADIASI

(*RADIATION PROTECTION*)

© Penerbit Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia (PRCI)

Penulis:
Juliana Sidauruk, M.Si.

Editor: Rusli

Cetakan Pertama: Maret 2025

Cover: Tim Penyusun

Tata Letak: Tim Kreatif PRCI

Hak Cipta 2025, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website: www.rcipress.rcipublisher.org
E-mail: rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2025 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I –: Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2025
Dimensi : 14,8 x 21 cm

ISBN

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku referensi yang berjudul Proteksi Radiasi ini dapat terselesaikan. Buku ini disusun sebagai panduan komprehensif yang membahas prinsip-prinsip dasar, teknik, dan aplikasi proteksi radiasi, baik di bidang medis (radiologi), industri, maupun penelitian.

Dalam era kemajuan teknologi yang semakin pesat, penggunaan radiasi menjadi bagian integral dari berbagai sektor. Namun, di sisi lain, potensi bahaya radiasi terhadap kesehatan manusia dan lingkungan mengharuskan penerapan standar proteksi radiasi yang optimal. Oleh karena itu, buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang mendalam mengenai pentingnya proteksi radiasi, mulai dari aspek teori hingga praktiknya.

Buku ini disusun dengan merujuk pada literatur ilmiah terkini, standar internasional, serta pengalaman praktis di lapangan. Penulis berupaya menyajikan materi secara sistematis dan mudah dipahami, sehingga dapat digunakan oleh mahasiswa, tenaga profesional, hingga praktisi di bidang terkait.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan buku ini, baik secara langsung maupun tidak langsung. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan buku ini di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas dan menjadi kontribusi positif bagi peningkatan keselamatan radiasi diberbagai bidang.

Medan, Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
BAB I PENDAHULUAN.....	2
BAB II DASAR FISIKA RADIASI DALAM BIDANG RADIODIAGNOSTIK	4
2.1 Terminologi	4
2.2 Transisi Elektron	7
2.3 Kestabilan Inti Atom	10
2.4 Pembangkit Radiasi Sinar-X.....	12
2.5 Peluruhan Radioaktif.....	17
2.6 Interaksi Radiasi Dengan Materi.....	19
2.7 Sumber Radiasi Penganion.....	22
BAB III RADIASI PENGION.....	34
3.1 Radioaktivitas dan Sumber Radiasi	34
3.2 Deteksi Radiasi.....	37
BAB IV KETENTUAN UMUM PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI.....	93
4.1 Sistem Proteksi Radiasi	93
4.2 Persyaratan Perundang-undangan	98
BAB V PROTEKSI & KESELAMATAN RADIASI PADA RADIODIAGNOSTIK.....	108
5.1 Tugas dan Tanggung Jawab.....	108
5.2 Pekerja Hamil.....	112
5.3 Perlengkapan Proteksi Radiasi Pada Radiodiagnostik.....	112
5.4 Ruang Pesawat Sinar-X.....	114
5.5 Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi Pada Radiodiagnostik.....	115

5.6 Pedoman Proteksi dan Keselamatan Radiasi Pesawat Sinar-X Mamografi	117
5.7 Pedoman Proteksi dan Keselamatan Radiasi Pesawat Sinar-X Gigi.....	117
BAB VI PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA RADIOTERAPI ...	119
6.1 Tugas dan Tanggung Jawab.....	119
6.2 Perlengkapan Proteksi Radiasi Pada Radioterapi	122
6.3 Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi Pada Radioterapi	123
6.4 Penanggulangan Kedaruratan	125
BAB VII PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA KEDOKTERAN NUKLIR	107
7.1 Tugas dan Tanggung Jawab	107
DAFTAR PUSTAKA	113

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Dosis Rata-Rata dari Sumber Radiasi Alam	36
Tabel 3.2. Dosis Radiasi Per Kapita Tahunan Sumber Radiasi Buatan	37
Tabel 3.3. Efek Radiasi pada Kulit	47
Tabel 4.1. Nilai Batas Dosis	97
Tabel 4.2. Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk CT-Scan	106
Tabel 4.3. Tingkat Panduan Diagnostik Radiografi Umum	106
Tabel 4.4. Tingkat Panduan Diagnostik Kedokteran Nuklir Diagnostik	107
Tabel 4.5. Tingkat Panduan Diagnostik Fluoroskopi Intervensional.....	107
Tabel 5.1. Ukuran Ruang untuk Pesawat Sinar-X	114
Tabel 5.2. Ukuran Ruang untuk Pesawat Sinar-X Mobile Station.....	115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Model atom Niels Bohr	5
Gambar 2.2. Transisi Elektron.....	7
Gambar 2.3. Blok diagram pesawat Sinar-X.....	13
Gambar 2.4. Produksi Sinar-X.....	14
Gambar 2.5. Hamburan koheren	19
Gambar 2.6. Terjadinya efek foto listrik.....	20
Gambar 2.7. Hamburan Compton.....	21
Gambar 2.8. Siklus Produksi Pasangan.....	22
Gambar 3.1. Kontruksi Survey Meter Kamar Pengionan	38
Gambar 3.2. Skema Pencacah GM	39
Gambar 3.3. Beberapa Jenis Surveymeter	40
Gambar 3.4. Alat Ukur Kontaminasi untuk Mengukur Kontaminasi Radiasi α dan β	41
Gambar 3.5. Dosimeter Film dengan Holder Penyangganya	42
Gambar 3.6. Dosimeter Termoluminesensi (TLD) dan Holder Penyangganya.....	43
Gambar 3.7. Dosimeter OSL.....	43
Gambar 3.8. Dosimeter RPL	44
Gambar 3.9. Dosimeter Saku QFE	45
Gambar 3.10. Dosimeter EPD	45
Gambar 3.11. Efek Deterministik Radiasi	46
Gambar 3.12. Efek Stokastik Radiasi	49
Gambar 6.1. Tombol “Emergency OFF” untuk Menonaktifkan Pesawat Co-60	126
Gambar 6.2. Pemindahan Pasien dari Bawah Berkas Radiasi Co-60.....	126

BAB I

PENDAHULUAN

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997, istilah "ketenaganukliran" merujuk pada bahan nuklir, zat radioaktif, dan sumber radiasi lainnya. Bahan nuklir seperti uranium-235 dan plutonium-239 digunakan untuk menghasilkan energi listrik, sementara zat radioaktif seperti Cobalt-60 dan Iridium-192, serta sumber radiasi lain seperti sinar-X atau akselerator linier (LINAC), digunakan dalam bidang medis, industri, dan pertanian. Ketiga sumber radiasi ini memiliki kesamaan dalam memancarkan radiasi pengion yang dapat menghasilkan ion pada atom yang dilaluinya, baik dalam bentuk partikel atau gelombang energi tinggi, seperti partikel alfa, beta, sinar gamma, sinar-X, dan neutron.

Selain radiasi pengion, ada pula radiasi non-pengion, yang tidak memiliki energi cukup untuk mengionisasi atom dalam materi yang dilaluinya. Contoh radiasi non-pengion antara lain cahaya tampak, gelombang radio, microwave, dan ultraviolet. Buku ini hanya membahas proteksi dan keselamatan terhadap radiasi pengion, mengingat manfaat besar yang telah diberikan oleh radiasi ini untuk kesejahteraan manusia. Dalam pembahasan selanjutnya, radiasi pengion akan disebut hanya sebagai "radiasi."

Setiap jenis radiasi memiliki kemampuan penetrasi yang berbeda-beda terhadap materi. Kemampuan penetrasi ini memungkinkan radiasi diterapkan di berbagai bidang untuk meningkatkan kualitas hidup manusia, terutama dalam bidang medis, industri, riset, pertanian, dan energi. Namun, meskipun memberikan banyak manfaat, aplikasi ketenaganukliran juga membawa risiko kesehatan. Efek radiasi dibagi menjadi dua jenis: deterministik dan stokastik. Efek deterministik terjadi pada organ atau jaringan yang terpapar dosis tinggi, sedangkan efek stokastik terjadi akibat paparan dosis rendah yang dapat menimbulkan penyakit dalam jangka panjang.

Untuk mengurangi risiko tersebut, setiap aplikasi radiasi harus diatur dan diawasi melalui sistem pengawasan keselamatan yang ketat. Sistem ini diterapkan dalam proteksi dan keselamatan radiasi, yang merupakan kombinasi dari berbagai disiplin ilmu seperti fisika, kimia, biologi, dan kedokteran. Secara umum, proteksi dan keselamatan radiasi merupakan

bagian dari keselamatan dan kesehatan kerja yang khusus diterapkan pada ketenaganukliran, yang juga dikenal sebagai Keselamatan dan Kesehatan Kerja Radiasi (K3 Radiasi).

Buku ini akan membahas berbagai aspek proteksi dan keselamatan radiasi, terutama dalam aplikasi keselamatan dan proteksi radiasi dalam radiodiagnostik, ketenaganukliran di rumah sakit, dimulai dengan konsep dasar radiasi pengion. Pemahaman tentang dasar ini penting untuk memahami cara kerja peralatan medis di rumah sakit yang menggunakan sumber radiasi, jenis sumber radiasi, pengukuran dosis radiasi, dan efek kesehatan yang mungkin timbul. Selanjutnya, akan dijelaskan mengenai prinsip proteksi radiasi, yang berlandaskan pada prinsip-prinsip yang jelas dan terukur. Pembahasan juga akan mencakup proteksi radiasi eksternal dan internal, yang menjelaskan upaya untuk mencegah paparan dosis radiasi, baik dari sumber di luar tubuh maupun yang masuk ke dalam tubuh. Proteksi radiasi juga mencakup peraturan yang berlaku di Indonesia, seperti yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten), termasuk pemantauan lingkungan kerja dan dosis pekerja.

Penerapan proteksi dan keselamatan radiasi di rumah sakit mencakup bidang radiodiagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir. Meskipun kedokteran nuklir dapat digunakan untuk diagnosa dan terapi, penanganan sumber radioaktif terbuka memerlukan kehati-hatian ekstra karena sumber ini tidak tertutup secara permanen dan dapat menyebar ke lingkungan. Sebaliknya, sumber radioaktif tertutup terikat kuat dalam bentuk kapsul atau padatan sehingga lebih aman digunakan.

BAB II

DASAR FISIKA RADIASI DALAM BIDANG RADIODIAGNOSTIK

Penegakkan diagnosa membutuhkan imejing atau penggambaran organ-organ tubuh yang mengalami kelainan fisiologis maupun patologis. Oleh karena itu diperlukan suatu media untuk menggambarkan keadaan organ yang mengalami kelainan. Penemuan sinar-X pada tahun 1895 oleh Wilhelm Conrad Rontgen, sangat membantu dalam, memvisualisasikan organ yang mengalami kelainan, dengan demikian penggunaan radiasi pada bidang kedokteran sangat penting untuk mendukung diagnosa.

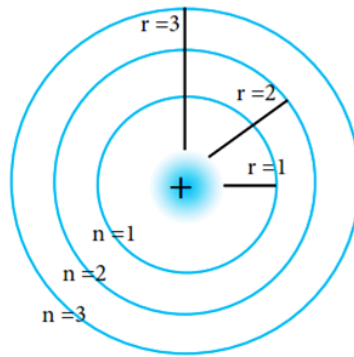
Radiasi mempunyai karakteristik yang menguntungkan, tapi disisi lain, bila tidak dipahami resiko dan karakteristiknya justru dapat membahayakan obyek yang dikenainya. Oleh karena itu radiografer yang melakukan pemanfaatan sinar-X dalam bidang kesehatan khususnya kegiatan radiografi perlu memahami konsep fisika radiasi, sebagai pengetahuan yang mendasar dalam memahami jenis radiasi, pembatasan energi yang aman, pengaturan paparan (eksposi) yang optimal serta karakteristik fisik radiasi yang dapat mempengaruhi kualitas radiasi dalam pencitraan diagnostik maupun pengaruh dosis yang diterima oleh pasien. Pemanfaatan fisika radiasi pada bidang radiografi diharapkan juga dapat menjadi pondasi dalam keselamatan radiasi.

2.1 Terminologi

Memahami fisika radiasi memerlukan pengetahuan tentang terminologi dasar yang dibutuhkan dalam konsep fisika radiasi. Adapun terminologi atau pengertian tersebut antara lain:

a) Struktur Atom

Pengetahuan tentang struktur atom suatu partikel sangat penting dan salah satu hal yang wajib diketahui, karena terpancarnya sebuah energi dari suatu bahan dipengaruhi oleh susunan atomnya. Oleh karena itu perlu dipahami arti dan pengertian atom.



Gambar 2.1. Model atom Niels Bohr

(Rini I, dkk. 2017)

Atom merupakan bagian terkecil materi yang masih memiliki sifat dasar dari materi tersebut. Suatu atom mempunyai ukuran sangat kecil atau mikroskopis sekitar 10^{-8} cm atau 10^{-10} m atau 1 angstrom ($=1\text{\AA}$). Atom dibedakan berdasarkan jenis unsur sesuai dengan simbol kimia seperti terdapat pada tabel periodik. Struktur atom Niels Bohr merupakan penyempurnaan teori atom sebelumnya yang dikemukakan oleh Rutherford dengan teori kuantum. Teori Neils Bohr menyebutkan bahwa elektron bergerak mengelilingi inti dengan memiliki lintasan tertentu yang disebut lintasan stasioner.

Elektron dapat bergerak pindah menuju kulit lintasan lainnya dengan menyerap atau melepas energi. Kulit atom merupakan tingkatan energi tertentu (berlapis). Energi elektron pada kulit luar lebih besar dari energi dalam. Semakin jauh dari inti, energi elektron semakin besar.

1. Inti Atom

Inti atom terletak dibagian tengah atom, memiliki massa terbesar dan berukuran mikroskopis sekitar 10^{10-12} cm atau cm atau 10^{-4} $\text{\AA}$. Hampir semua inti atom tersusun dari dua jenis partikel yang disebut proton dan neutron, kecuali hidrogen yang hanya memiliki proton saja.

2. Bilangan Avogadro

Bilangan Avogadro didefinisikan sebagai bilangan yang menyatakan jumlah atom dalam satu gram atom atau jumlah molekul di dalam satu gram molekul zat. Salah satu penggunaan bilangan Avogadro adalah untuk mengetahui jumlah atom dalam suatu materi atau unsur.

Bilangan Avogadro lazim dituliskan dengan simbol N_A dimana:

$$N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/gram atom}$$

$$= 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/gram molekul}$$

3. Satuan massa atom (sma)

Oleh karena massa suatu atom dan inti atom beserta partikel-partikel penyusun inti atom berukuran sangat kecil, maka diperlukan satuan dalam menentukan nilai besaran massa. Satuan tersebut adalah "satuan massa atom". Perlu diketahui setiap satu mol zat mengandung $6,023 \times 10^{23}$ molekul atau atom (bilangan Avogadro) dan berat 1 mol zat dinyatakan dalam gram sama dengan berat molekul/atomnya. Kongres Tenth General Assembly of the Union of Pure and Applied Physics tahun 1960 telah menetapkan massa atom ^{12}C sebagai standar. Jadi $1 \text{ sma} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ gram}$.

4. Elektron

Elektron adalah partikel yang bermuatan negatif. Elektron ditemukan pertama kali secara eksperimental oleh J.J. Thompson pada tahun 1897. Elektron merupakan sebuah partikel yang bermuatan listrik negatif sebesar:

$$e = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ Coulomb, dan memiliki massa sebesar:}$$

$$m_e = 0,000549 \text{ sma} = 9,1091 \times 10^{-31} \text{ kg.}$$

5. Proton

Proton adalah partikel dalam inti atom yang bermuatan positif. Proton memiliki muatan yang besarnya sama dengan elektron, sedangkan massanya jauh lebih besar. Massa Proton sebesar:

$$M_p = 1,007287 \text{ sma} = 1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Ilmuan yang menemukan proton adalah C.D. Anderson pada tahun 1932. Bersama-sama dengan neutron, proton merupakan partikel penyusun inti atom, kecuali pada atom hidrogen yang inti atomnya hanya terdiri dari sebuah proton saja.

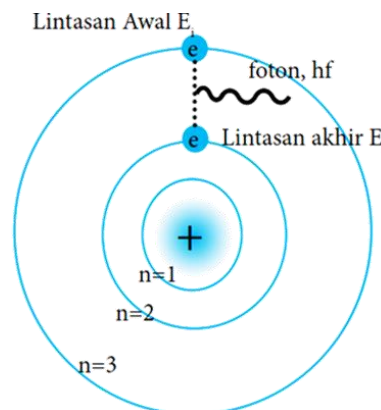
6. Neutron

Neutron ditemukan oleh Chadwick pada tahun 1932. Dibandingkan terhadap proton, neutron memiliki massa yang hampir sama namun tidak bermuatan listrik. Neutron merupakan partikel yang tidak bermuatan dengan massa

sebesar: $m_e = 1,008665 \text{ sma} = 1,6748 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Neutron bersama proton sebagai partikel penyusun inti atom, dikenal juga dengan sebutan nucleon.

2.2 Transisi Elektron

Transisi (perpindahan elektron diantara lintasan akan menyerap atau memancarkan radiasi (foton). Besar energi radiasi yang dipancarkan berhubungan dengan tetapan plank dan frekuensi yang dirumuskan dengan $h.f = \Delta E = E_i - E_f$. Perhatikan gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2. Transisi Elektron

(Rini I, dkk. 2017)

a) Lintasan Orbital Dan Energi Pada Transisi Elektron

Pada setiap tingkat energi (kulit) memiliki satu atau beberapa subtingkat energi (subkulit). Setiap subtingkat energi (subkulit) memiliki satu atau beberapa orbital. Tiap orbital dapat ditemukan paling banyak 2 elektron. Posisi atau kedudukan elektron dalam orbital tidak dapat ditentukan dengan pasti sesuai dengan persamaan ketidakpastian Heisenberg. Kebolehjadian atau kemungkinan ditemukannya elektron dalam orbital dapat ditentukan dari bilangan kuantumnya.

b) Pita Energi

Pita energi didefinisikan sebagai kumpulan garis pada tingkat energi yang sama dan saling berimpit atau berdekatan. Teori pita energi merupakan hukum dasar yang menjelaskan hubungan antara elektron dengan kulit orbit dalam atom suatu zat padat. Adapun penjelasan hubungan tersebut sebagai berikut:

Elektron bergerak dalam kulit orbit. Elektron tidak dapat mengelilingi inti atom dalam ruangan yang ada diantara dua buah kulit orbit. Setiap kulit orbit berhubungan dengan sebuah rentang energi khusus, elektron-elektron yang bergerak dalam suatu kulit orbit akan memiliki sejumlah energi yang sama. Level energi dalam kulit akan meningkat ketika makin jauh dari inti atom. Elektron untuk berpindah dari suatu kulit ke kulit yang lain menyerap energi untuk menyesuaikan level energi antara level energi kulit awal dengan level energi kulit yang dituju.

Elektron yang berada pada lintasan terluar dari atom disebut dengan elektron valensi. Interaksi elektron valensi membuat ikatan antar atom-atom. Ikatan antara atom-atom ini yang membentuk zat padat. Sehingga dapat kita katakan bahwa zat padat merupakan kumpulan atom yang terikat karena interaksi elektron valensi. Hal ini dapat disimpulkan bahwa elektron valensi selalu memiliki level energi yang tertinggi dalam setiap atom.

Jenis pita energi antara lain:

- a. Pita valensi: pita yang diduduki oleh elektron.
- b. Pita konduksi: pita kosong yang berada di atas pita terlarang.
- c. Pita terlarang: pita yang tidak memiliki energi di dalamnya.

c) Elektron Volt (eV)

Elektron volt merupakan satuan energi ukuran kecil yang akan banyak dijumpai dalam fisika radiasi. Satu elektron volt (eV) adalah energi yang diperoleh elektron setelah melintasi beda potensial satu volt di dalam medan listrik, jadi:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Di samping eV, sering digunakan pula kilo elektron volt (keV) dan mega elektron volt (MeV), yaitu:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^3 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$$

d) Kesetaraan antara Massa dan Energi

Menurut teori relativitas Einstein (1905), massa tidak lain adalah suatu bentuk energi yang sangat padat atau mampat, dan dinyatakan oleh rumusnya yang terkenal yaitu:

$$E = mc^2$$

Dimana, m = massa benda; c = kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa, $C = 3 \times 10^8$ m/detik. Berdasarkan rumus diatas, maka massa sebesar 1 sma adalah setara dengan energi sebesar:

$$E = (1,66 \times 10^{-27} \text{kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/det})^2$$

$$= 14,94 \times 10^{-13} \text{ Joule}$$

$$= 931 \text{ MeV}$$

e) Radiasi Elektromagnetik

Radiasi elektromagnetik mamancarkan gelombang elektromagnetik. Menurut Max Planck (1960) pemancaran energi radiasi elektromagnetik dari sumbernya tidak berlangsung secara kontinyu melainkan secara terputus (diskrit), merupakan paket- paket yang harganya tertentu yang disebut kuantum. Besar energi setiap kuantum adalah bergantung pada frekuensi gelombang menurut rumus: $E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$.

Di mana:

E = energi dalam Joule

h = konstanta Planck ($= 6,6262 \times 10^{-34}$ Joule detik)

f = frekuensi (siklus/detik atau gelombang/detik)

λ = Panjang gelombang dalam meter

c = kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa

Teori kuantum yang dikemukakan oleh Einsten (1905) selanjutnya digunakan untuk menerangkan mekanisme terjadinya efek fotolistrik, ditarik kesimpulan bahwa kuantum juga memiliki massa efektif yang selanjutnya dikenal sebagai foton. Besarnya massa efektif dari foton adalah:

$$m = h \cdot f / c^2$$

Sebagian dari spektrum radiasi elektromagnetik tidak dapat dilihat mata, kecuali radiasi elektromagnetik dengan rentang panjang gelombang antara 4000Å sampai 7000 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$). Panjang gelombang tersebut adalah spektrum cahaya yang dapat dilihat mata. Adapun spektrum dari berbagai macam radiasi elektromagnetik yang tidak dapat dilihat mata, antara lain: sinar kosmik, sinar-gamma, sinar-X, gelombang radio, tv, radar.

2.3 Kestabilan Inti Atom

Untuk menunjukkan kondisi atom dapat terlihat dalam struktur atom dan inti atom. Atom dengan kondisi tidak stabil dapat menghasilkan radiasi. Radiasi dihasilkan pada saat terjadi ketidakstabilan inti. Termasuk radiasi sinar-X yang digunakan untuk menggambarkan organ tubuh manusia dihasilkan dari suatu ketidakstabilan inti bahan anoda. Untuk itu dalam memahami struktur atom kita perlu mengingat kembali pengertian-pengertian di bawah ini:

- 1) Simbol Atom dan Nuklida. Suatu gabungan dari nukleon tertentu yang merupakan inti atom unsur tertentu disebut nuklida. Atom dan nuklida dibedakan sesuai dengan lambang kimianya (nama unsur kimianya). Salah satu cara untuk menyatakan simbol atom dan nuklida adalah sebagai berikut:

${}_Z^AX$ =

A = Nomor massa atom atau nuklida, yang menyatakan jumlah proton dan neutron dalam inti atom.

Z = Nomor atom nuklida, yang menyatakan jumlah proton dalam inti atom. Pada atom yang netral (tidak bermuatan listrik) Z sama dengan jumlah elektron yang mengitari inti atom.

X = Lambang kimia atom unsur.

Berdasarkan lambang kimia unsur dibedakan dengan nomor atomnya, tetapi suatu unsur dapat memiliki atom-atom dengan massa yang berbeda, sehingga muncul beberapa pengertian:

- a) Isotop, adalah nuklida-nuklida dengan nomor atom (Z) sama tetapi berbeda nomor massanya (A). Isotop-isotop memiliki jumlah proton yang sama di dalam intinya tetapi berbeda jumlah neutronnya. Contohnya ${}_{29}\text{Cu}^{63}$.
 - b) Isoton, adalah nuklida yang memiliki Z berbeda; jumlah neutron sama. Contohnya: ${}_{12}\text{Mg}^{26}$; ${}_{13}\text{Al}^{27}$
 - c) Isobar, adalah nuklida yang mempunyai nomor massa (A) sama; sedangkan nomor atom (Z) berbeda. Contohnya: ${}_{14}\text{Si}^{31}$; ${}_{15}\text{P}^{31}$
 - d) Isomer, adalah nuklida yang mempunyai nomor massa (A) dan nomor atom (Z) sama tetapi energi berbeda. Contohnya: ${}_{28}\text{Ni}^{60}$;
- 2) Untuk memahami kapan atom dikatakan netral, kapan atom disebut Ion maka perlu dipahami struktur kestabilan atom:
- a) Atom netral adalah atom yang memiliki jumlah proton (+) sama dengan jumlah elektron (-).
 - b) Jika tidak netral disebut "ion".
 - c) Atom yang kekurangan elektron, atau jumlah protonnya lebih banyak dari elektronnya, menjadi ion positif.
 - d) Atom yang kelebihan elektron, atau jumlah protonnya lebih sedikit dari elektronnya, menjadi ion negatif.
- 3) Definisi radiasi
- a) Radiasi adalah energi atau partikel yang dipancarkan oleh sumber radiasi atau zat radioaktif tanpa melalui media perantara.
 - b) Sumber radiasi: Perangkat yang dapat memancarkan radiasi. Contoh: tabung sinar-X, akselerator, reaktor.
 - c) Zat Radioaktif: Zat yang memancarkan radiasi karena inti atomnya tidak stabil. Contoh: Zat Radioaktif pemancar sinar/partikel λ , β , γ , dan neutron.

- d) Radiasi yang dapat mengionkan zat yang dilaluinya disebut radiasi pengion.

Contoh: radiasi α , β , γ , neutron dan sinar-X. Radiasi pengion dapat dimanfaatkan dalam dunia industri, pertanian, penelitian dan kesehatan.

- a) Pemanfaatan radiasi pengion dapat menghasilkan risiko bahaya yang tidak kecil “efek biologi radiasi”.
 - b) Radiasi pengion menjadi objek yang kegiatan pemanfaatannya diawasi oleh BAPETEN “peraturan perundang-undangan ketenaganukliran.
- 4) Jenis radiasi ada 2 macam:

- a) Radiasi

Adalah pancaran energi dalam bentuk gelombang maupun partikel.
Contoh: radiasi UV, infra red dan lain lain.

- b) Radiasi pengion

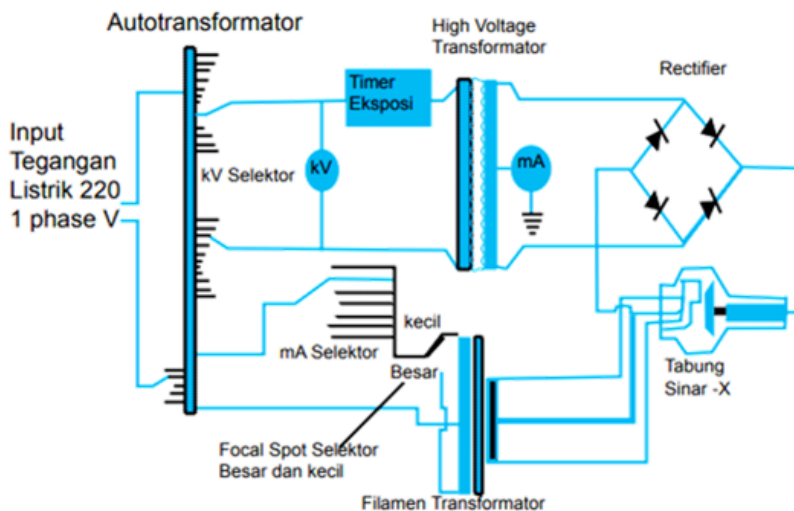
Adalah gelombang elektromagnetik dan partikel bermuatan yang karena energi yang dimilikinya mampu mengionisasi media yang dilaluinya (UU Ketenaganukliran, 2007), contoh: radiasi sinar-X, radiasi alfa, beta dan sebagainya.

2.4 Pembangkit Radiasi Sinar-X

Sinar-X merupakan sarana utama pembuatan gambar radiograf yang dibangkitkan dengan suatu sumber daya listrik yang tinggi. Sehingga sinar-X merupakan radiasi buatan yang berkaitan dengan produksi sinar-X.

- 1) Spektrum sinar-X

Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895, menemukan jenis sinar baru yang memiliki kemampuan daya tembusnya besar. Sinar ini disebut dengan sinar-X. Sinar-X dihasilkan, jika elektron cepat menumbuk materi.



Gambar 2.3. Blok diagram pesawat Sinar-X

(Rini I, dkk. 2017)

Sinar-X ini merambat menurut garis lurus walaupun melalui medan magnet dan medan listrik, selain itu sinar-X dapat menembus bahan dengan mudah menyebabkan bahan fosfor berpendar dan menyebabkan perubahan plat fotografik. Bertambah cepat elektron dalam tabung sinar-X maka meningkat pula kemampuan tembus sinar-X itu dan bertambah banyak jumlah elektron maka bertambah besar pula intensitas (jumlah) berkas sinar-X. Setelah penemuan itu orang mulai menduga bahwa sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik.

Teori elektromagnetik (teori Planck) meramalkan bahwa muatan listrik yang dipercepat akan meradiasi gelombang elektromagnetik dan elektron yang bergerak cepat yang tiba-tiba dihentikan mengalami suatu percepatan. Radiasi yang ditimbulkan dalam keadaan seperti ini diberi nama *Bremstrahlung* (radiasi pengereman) (Beiser,1990).

Elektron-elektron yang melintas dengan kecepatan cukup karena dipercepat oleh adanya tegangan tinggi dapat keluar dari orbitnya, dalam bahan anoda. Proses ini menyebabkan suatu pancaran sinar-X dengan panjang gelombang yang sangat spesifik, yang dikenal dengan radiasi karakteristik, karena panjang gelombangnya adalah merupakan karakter elemen yang memancarkan radiasi itu (Plaats,1969).

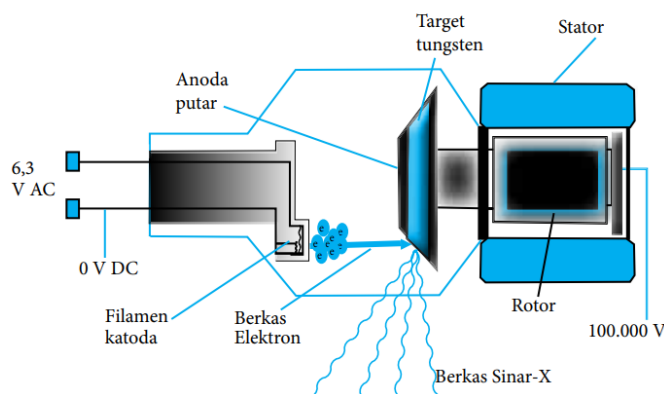
2) Syarat terjadinya Sinar-X adalah

- a) Adanya sumber arus/tegangan listrik.
- b) Adanya generator sebagai pembangkit tegangan tinggi (high tension trafo).
- c) Adanya beda tegangan yang tinggi antara filamen sebagai katoda penghasil elektron dan anoda sebagai target tumbukan elektron.
- d) Adanya filamen yang mampu membangkitkan awan elektron. Filamen tersusun dari bahan metal yang mempunyai titik didih yang tinggi dan penghantar panas yang baik sehingga mudah panas dan tidak mudah meleleh.
- e) Adanya elektron filamen yang bergerak cepat menumbuk atom target.
- f) Pancaran energi radiasi sinar-X dari suatu titik focus pada target.

3) Produksi Sinar-X

Produksi sinar-X terjadi dalam tabung sinar-X seperti terlihat dalam gambar 2.4, sedangkan mekanisme proses terjadi produksi sinar-X adalah:

- a) Kutub negatif merupakan filamen. Filamen tersebut akan terjadi panas jika ada arus listrik yang mengalirinya. Panas menyebabkan emisi (keluarnya elektron) pada filamen tersebut. Peristiwa emisi karena proses pemanasan disebut dengan termionik. Filamen adalah katoda (elemen negatif).



Gambar 2.4. Produksi Sinar-X
(Rini I, dkk. 2017)

- b) Kutub positif (anoda) merupakan target, dimana elektron cepat akan menumbuknya, terbuat dari tungsten maupun molybdenum, tergantung kualitas Sinar-X yang ingin dihasilkan. Anoda dari bahan molybdenum dipergunakan untuk pesawat mamografi.
 - c) Apabila terjadi beda tegangan yang tinggi antara kutub positif (anoda) dan kutub negatif (katoda) maka elektron pada katoda akan menuju ke anoda dengan sangat cepat.
 - d) Akibat tumbukan yang sangat kuat dari elektron katoda maka elektron orbit yang ada pada atom target (anoda) akan terpental keluar.
 - e) Terjadi kekosongan elektron pada orbital atom target yang terpental tersebut, maka elektron orbit yang lebih tinggi berpindah ke elektron yang kosong tersebut, hal ini terjadi karena elektron selalu saling mengisi tempat yang kosong jika ada elektron lain yang keluar, dalam rangka terjaga kestabilan atom.
 - f) Akibat perpindahan elektron dari orbit yang lebih luar (energi besar) ke yang lebih dalam (energi lebih rendah), maka terjadi sisa energi.
 - g) Sisa energi tersebut akan dikeluarkan dalam pancaran foton dalam bentuk sinar-X karakteristik.
 - h) Jika elektron yang bergerak mendekati inti atom (nukleus) dan dibelokkan atau terjadi pengereman maka terjadi sinar-X bremsstrahlung.
- 4) Berdasarkan proses terjadinya sinar-X dibagi menjadi 2 macam yaitu:
- a) Radiasi akibat perlambatan berkas elektron cepat yang mengenai target dan mendekati inti atom serta dibelokkan dan terjadi pengereman disebut bremsstrahlung dan menghasilkan spektrum kontinyu. Radiasi inilah yang merupakan sinar guna yang efektif untuk membuat gambaran radiograf pada emulsi film.
 - b) Radiasi akibat tumbukan berkas elektron yang bergerak cepat dengan elektron orbit dari atom target, dikenal dengan sinar-X karakteristik yang memiliki spektrum garis atau diskrit. Radiasi yang dihasilkan dari proses ini merupakan radiasi hamburan, yang

tingkat puncak energinya tidak tetap, sehingga spektrumnya berupa spektrum garis.

5) Sifat Radiasi Sinar-X

Mengenal dan memahami sinar-X perlu mengetahui karakteristik sifat-sifat sinar-X. Sifat-sifat tersebut antara lain:

- a) Sinar-X merambat keluar dari fokus menurut garis lurus.
- b) Sinar-X mempunyai daya tembus yang besar.
- c) Sinar-X mampu mengionisasi materi yang dilaluinya.
- d) Sinar-X tidak dapat dibelokkan oleh medan magnet maupun medan listrik.
- e) Sinar-X mampu melakukan ionisasi organ biologi yang ditembusnya.
- f) Sinar-X mampu melakukan perpendaran pada garam logam yang ditembusnya. Sifat inilah yang digunakan untuk memendarkan fosfor/fluoresensi pada proses fluoresensi maupun kecepatan screen film pada pembuatan radiograf.
- g) Sinar-X dapat menghitamkan plat/emulsi film yang ditembusnya. Sifat inilah yang digunakan dalam penggambaran radiografi bidang medis. Berdasarkan pemahaman sifat-sifat sinar-X inilah seorang radiografer harus memperhatikan karakteristik radiasi sinar-X yang dihasilkan.

f) Kuantitas & Kualitas Radiasi

Kuantitas radiasi merupakan besaran yang menyatakan jumlah atau intensitas radiasi yang dipancarkan pada luasan tertentu. Kuantitas dinyatakan dengan intensitas yang berbanding lurus dengan besarnya tegangan tabung (kV), arus tabung (mA) dan waktu, serta berbanding terbalik dengan jarak (r^2). Dengan demikian kuantitas sinar-X dinyatakan:

$$I = kV^2 \frac{mAs}{r^2}$$

Sedangkan kualitas radiasi menyatakan kemampuan daya tembus radiasi sinar-X dalam menembus bahan, yang berkorelasi dengan tegangan tabung. Semakin besar tegangan tabung yang digunakan, maka besar pula kualitas sinar-X yang dihasilkan, sehingga daya tembus yang dihasilkan juga lebih

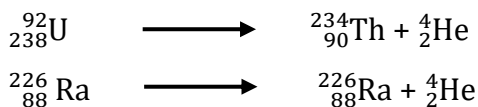
besar. Sifat fisik inilah yang harus dipedomani oleh radiografer dalam memanfaatkan radiasi sinar-X. Penerapan tindakan proteksi radiasi berdasarkan karakteristik kuantitas dan kualitas radiasi ini harus menjadi pegangan sehingga radiasi yang dipancarkan pada organ tubuh dapat diberikan secara optimal dengan memproduksi sinar-X berdaya guna tinggi. Harapannya tindakan tersebut dapat mereduksi ionisasi padapada obyek yang dilalui, karena ionisasi dapat merusak jaringan organ.

2.5 Peluruhan Radioaktif

Peluruhan radioaktif adalah peristiwa pemancaran sinar radioaktif secara spontan. Inti atom yang tidak stabil selalu memancarkan secara spontan sinar radioaktif, hingga akhirnya berubah menjadi inti atom yang stabil. Unsur yang selalu memancarkan sinar radiasi tersebut dinamakan unsur radioaktif (isotop radioaktif).

1) Peluruhan Sinar Alfa

Suatu inti yang tidak stabil dapat meluruh menjadi inti yang lebih ringan dengan memancarkan partikel alfa (inti atom helium). Pada peluruhan alfa terjadi pembebasan energi. Energi yang dibebaskan akan menjadi energi kinetik partikel alfa dan inti anak. Inti anak memiliki energi ikat per nukleon yang lebih tinggi dibandingkan induknya. Jika inti memancarkan sinar α (inti ${}^4_2\text{He}$), maka inti tersebut kehilangan 2 proton dan 2 neutron, sehingga Z (nomor atom) berkurang 2, n berkurang 2, dan A (nomor massa) berkurang 4. Persamaan peluruhannya seperti pada unsur uranium:

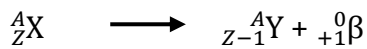
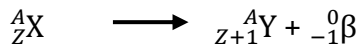


2) Peluruhan Sinar Beta

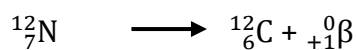
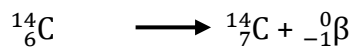
Salah satu bentuk peluruhan sinar beta adalah peluruhan neutron. Neutron akan meluruh menjadi proton, elektron, dan antineutrino. Antineutrino merupakan partikel netral yang mempunyai energi, tetapi tidak memiliki massa. Bentuk peluruhan sinar beta yang lain adalah peluruhan proton. Proton akan meluruh menjadi neutron, positron, dan neutrino. Neutrino memiliki sifat yang sama dengan antineutrino. Peluruhan sinar beta

bertujuan agar perbandingan antara proton dan neutron di dalam inti atom menjadi seimbang sehingga inti atom tetap stabil.

Jika inti radioaktif memancarkan sinar beta (β) maka nomor massa inti tetap (jumlah nukleon tetap), tetapi nomor atom berubah. Terjadi dua proses peluruhan, yaitu:



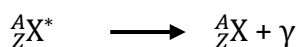
Contoh:



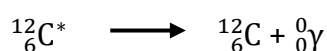
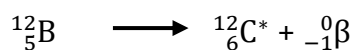
3) Pancaran (peluruhan) Sinar Gamma

Suatu inti atom yang berada dalam keadaan tereksitasi dapat kembali ke keadaan dasar (ground state) yang lebih stabil dengan memancarkan sinar gamma. Peristiwa ini dinamakan peluruhan sinar gamma. Atom yang tereksitasi biasanya terjadi pada atom yang memancarkan sinar alfa maupun sinar beta, karena pemancaran sinar gamma biasanya menyertai pemancaran sinar alfa dan sinar beta. Peluruhan gamma hanya mengurangi energi saja, tetapi tidak mengubah susunan inti.

Seperti dalam atom, inti atom dapat berada pada keadaan eksitasi, yaitu keadaan inti yang tingkat energinya lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Inti yang berada pada keadaan eksitasi diberi tanda star (*). Keadaan eksitasi inti ini dihasilkan dari tumbukan dengan partikel lain. Persamaan peluruhan sinar gamma:



Inti yang berada dalam keadaan eksitasi pada umumnya terjadi setelah peluruhan. Misalnya:



Peluruhan alfa menyebabkan nomor atom (Z) berkurang dua dan nomor masa (A) berkurang empat, oleh karena itu sebuah inti baru akan terbentuk. Sedangkan bentuk peluruhan beta akan menambah atau mengurangi nomor

atom sebesar (nomor masa tetap sama). Perhatikan pada reaksi unsur Boron di atas yang menjadi Carbon.

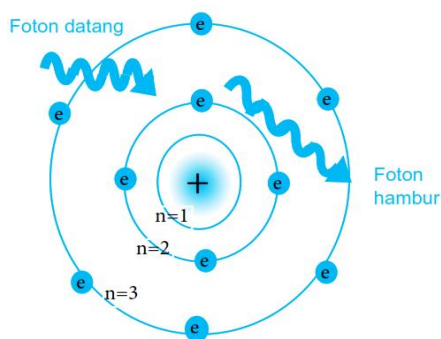
2.6 Interaksi Radiasi Dengan Materi

Interaksi antara sinar-X dengan materi akan terjadi pemindahan energi dari radiasi tersebut pada materi. Pada dasarnya materi itu tersusun atas kumpulan atom dan elektron-elektron. Radiasi berinteraksi dengan salah satu atom atau kedua unsur pokok pembentuk materi itu. Terjadinya interaksi beserta daya tembusnya tergantung pada jenis dan energi radiasi serta sifat medium penyerap itu sendiri (Cember, 1983).

Macam-macam interaksi radiasi dengan materi adalah sebagai berikut:

1) Hamburan koheren.

Interaksi foton dengan atom pada hamburan koheren tidak mempengaruhi elektron dan tidak ada elektron yang terlepas dari lintasannya. Hamburan ini disebut juga sebagai hamburan Thomson. Hamburan koheren sering terjadi pada energi dibawah 30 kV. Foton berenergi rendah mengenai atom materi dan energi tersebut diserap oleh atom, sehingga atom akan memberikan respon dengan mengeluarkan energi yang besar dalam bentuk foton dengan panjang gelombang yang sama dengan foton semula dan energinya juga sama tetapi arahnya sedikit berbeda. Perhatikan gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5. Hamburan koheren

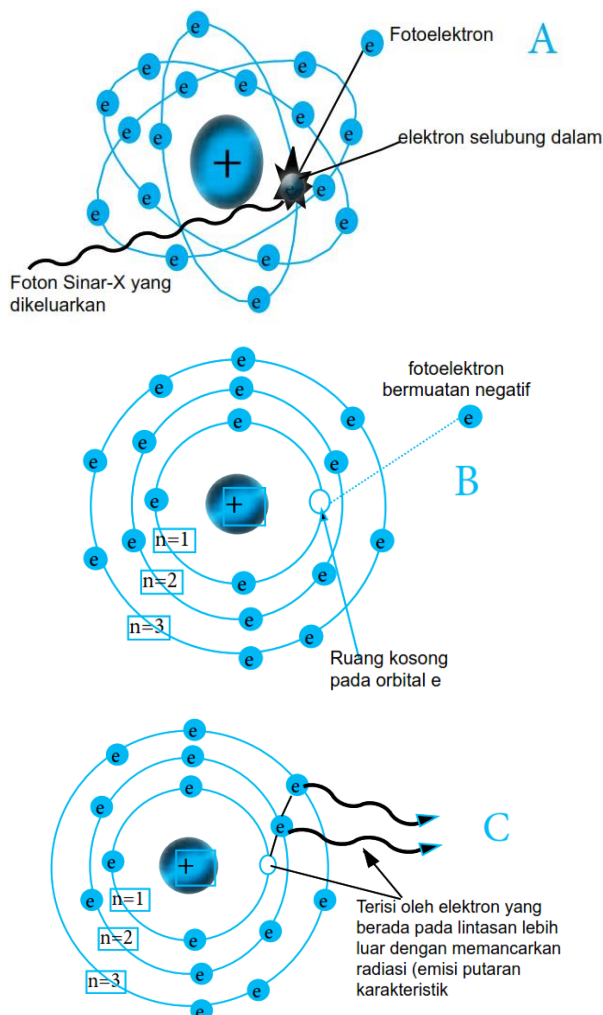
(Rini I, dkk. 2017)

2) Efek Fotolistrik

Peristiwa efek fotolistrik terjadi dengan semua energi foton (sinar-X) datang terserap atau ditransfer kepada elektron yang menyebabkan elektron terlepas dari lintasannya. Penyerapan fotolistrik dapat terjadi dengan energi

foton datang harus lebih besar atau sama dengan energi ikat elektron (Busberg, 2002).

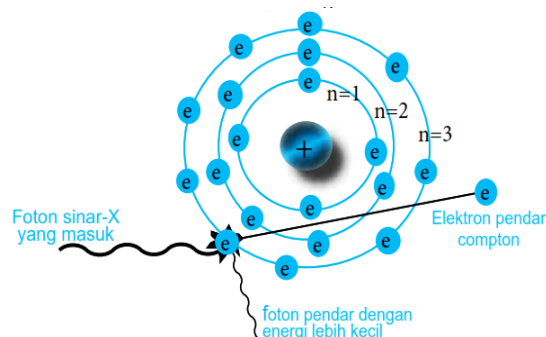
Energi foton yang berhubungan dengan penyerapan fotolistrik akan meningkat seiring dengan tingginya nomor atom suatu unsur (elemen). Sehingga unsur yang memiliki nomor atom tinggi akan menyerap energi foton/sinar-X (penyerapan fotolistrik). Penyerapan fotolistrik yang sangat kuat terhadap nomor atom unsur tinggi, inilah yang membuat timbal menjadi suatu bahan pelindung yang baik terhadap sinar-X. Untuk unsur bernomor atom rendah efek fotolistrik relatif kurang penting. Energi foton ini berenergi rendah (30-150 kV), seperti energi sinar-X yang dipergunakan di diagnostik. Perhatikan gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Terjadinya efek foto listrik
(Rini I, 2017)

3) Hamburan Compton

Merupakan suatu tumbukan lenting sempurna antara sebuah foton dengan sebuah elektron bebas. Elektron bebas adalah elektron yang energi ikatnya terhadap suatu atom jauh lebih kecil dari energi foton. Energi foton sebagian digunakan untuk mengeluarkan elektron dan sebagian lagi digunakan untuk meneruskan elektron tetapi dengan arah yang berbeda. Hamburan Compton juga terjadi pada penggunaan di radiodiagnostik dengan rentang energi 18-150 Kv (Bushberg, 2002).



Gambar 2.7. Hamburan Compton

4) Produksi pasangan

Efek ini terjadi pada tingkatan energi sekurang-kurangnya 1,02 MeV. Foton akan bergerak mendekati inti atom dan secara spontan akan menghilang kemudian energinya akan muncul kembali dalam bentuk suatu positron dan suatu elektron dengan massa yang besar dan energi yang sama. Setelah pembentukan suatu pasangan maka positron dan elektron tersebut akan diproyeksikan ke arah depan (relatif terhadap arah datang foton) dan melepaskan energinya. Jika positron tersebut telah mengeluarkan semua energi kinetiknya maka positron tersebut akan bergabung dengan sebuah elektron untuk menghasilkan dua kuantum yang masing-masing merupakan radiasi anihilasi sebesar 0,51 MeV.