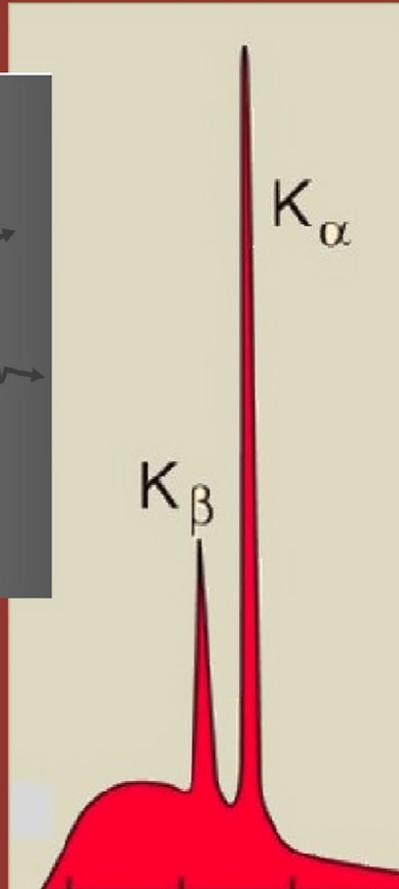
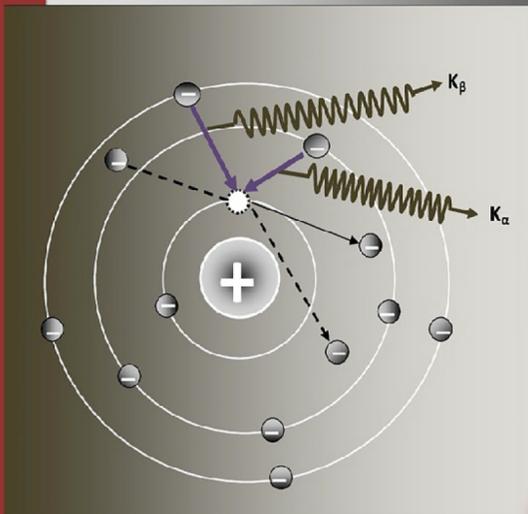
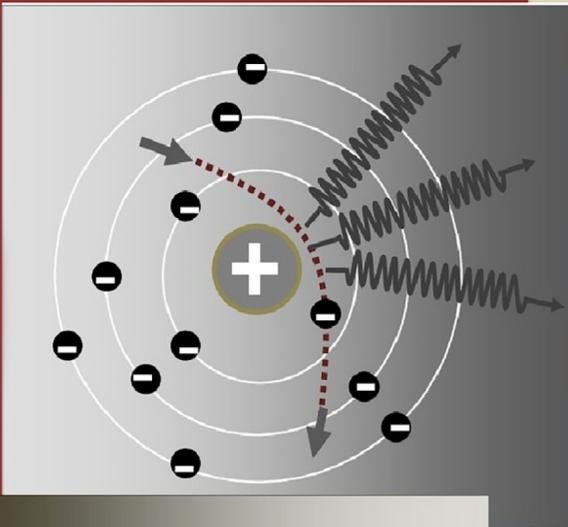


# Sinar-X

**MENJAWAB MASALAH KESEHATAN**



**Mukhlis Akhadi**

# **Sinar-X**

**MENJAWAB MASALAH  
KESEHATAN**

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

**Mukhlis Akhadi**

# **Sinar-X**

**MENJAWAB MASALAH  
KESEHATAN**



**SINAR-X MENJAWAB MASALAH KESEHATAN**

**Mukhlis Akhadi**

Desain Cover :

**Ali Hasan Zein**

Sumber :

Mukhlis Akhadi

Tata Letak :

**Gofur Dyah Ayu**

Proofreader :

**Avinda Yuda Wati**

Ukuran :

**x, 163 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :

**978-623-02-0666-5**

Cetakan Pertama :

**Februari 2020**

Hak Cipta 2020, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2020 by Deepublish Publisher**

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**

**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

## **KATA PENGANTAR**

Tanggal 8 November 1895 dicatat dalam sejarah perkembangan ilmu pengetahuan sebagai hari penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Roentgen. Tidak lama setelah itu, manusia menemukan jalan untuk memanfaatkan sinar-X dalam kehidupan sehari-hari. Banyak bidang kehidupan yang akhirnya tersentuh oleh aplikasi sinar-X. Dalam bidang kimia dimanfaatkan untuk mempelajari struktur kristal, dalam bidang industri dimanfaatkan untuk memeriksa kualitas sambungan las-lasan dan cacat di dalam logam, dalam bidang forensik dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan unsur-unsur kelumit dan mengungkap kasus kriminal, dalam bidang seni dimanfaatkan untuk mendeteksi pemalsuan lukisan, dalam penerbangan udara dimanfaatkan untuk memindai barang-barang bawaan penumpang dan mencegah aksi terorisme, dalam bidang astronomi dimanfaatkan untuk mengungkap rahasia benda-benda langit, dan dalam bidang kesehatan dimanfaatkan untuk keperluan radiodiagnosis, radioterapi dan penelitian medis.

Begitu luas aplikasi sinar-X dalam kehidupan manusia. Namun buku yang sedang berada di tangan pembaca ini membatasi diri dan hanya membahas mengenai pemanfaatan sinar-X dalam bidang kesehatan saja. Dari segi popularitas, hampir setiap orang mengetahui, paling tidak pernah mendengar, tentang pemeriksaan atau pemotretan bagian-bagian dalam tubuh manusia dengan sinar-X atau sinar roentgen. Sebagian yang lainnya bahkan pernah menjalani pemeriksaan kesehatan maupun pengobatan dengan sinar-X tersebut. Tidak dapat dibayangkan, bagaimana wajah dunia kesehatan saat ini seandainya sinar-X tidak ditemukan oleh Roentgen. Dengan cara apa para dokter mendapatkan informasi kondisi di dalam tubuh untuk mendiagnosis, menangani serta mengobati pasien.

Meski nama sinar-X atau sinar roentgen sudah begitu populer, namun luasnya aplikasi sinar-X di bidang kesehatan belum sepenuhnya diketahui oleh masyarakat. Umumnya masyarakat tidak mengenali secara detail berbagai jenis kegiatan pemanfaatan sinar-X di bidang kesehatan. Minimnya pengetahuan masyarakat tentang sinar-X dan pemanfaatannya dalam bidang kesehatan tidak terlepas dari minimnya bahan bacaan yang

membahas masalah itu. Jarang sekali di toko buku ditemukan literatur yang mengupas masalah sinar-X secara komprehensif. Beberapa buku literatur untuk pendidikan tinggi mengupas masalah sinar-X secara parsial sebatas keperluan disesuaikan dengan tujuan penulisan literatur tersebut. Literatur fisika modern membahas sinar-X dari aspek fisiknya saja, sementara literatur kedokteran menyinggung sinar-X sebatas aplikasinya di bidang kesehatan saja.

Bertitik tolak dari kenyataan tersebut, dirasa sangat perlu untuk menghadirkan sebuah buku yang membahas secara komprehensif tentang sinar-X dan aplikasinya di bidang kesehatan. Kehadiran buku semacam itu diharapkan dapat memberi pencerahan dan memperkaya khasanah pengetahuan masyarakat pada umumnya tentang berbagai aspek yang berkaitan dengan sinar-X, mulai dari aspek fisika hingga aplikasinya yang sangat luas dalam berbagai kegiatan di bidang kedokteran modern. Bertitik tolak dari kenyataan tersebut, penulis memberanikan diri untuk menghadirkan buku ini dalam rangka mengisi kekosongan pustaka yang terjadi saat ini.

Disadari sepenuhnya jika pembahasan dalam buku ini masih banyak kekurangan karena terbatasnya pengetahuan dan kemampuan dalam diri penulis. Oleh sebab itu, kritik dan saran dari pembaca dalam rangka perbaikan dan penyempurnaan isi buku ini tetap ditunggu. Semoga kehadiran buku ini dapat memberi pencerahan dan memperkaya khasanah pengetahuan masyarakat pada umumnya tentang pentingnya arti penemuan sinar-X dalam mengatasi masalah kesehatan penduduk dunia.

Tangerang Selatan, 02 Maret 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

|  |           |
|--|-----------|
| KATA PENGANTAR .....                       | v         |
| DAFTAR ISI.....                            | vii       |
| DAFTAR GAMBAR .....                        | ix        |
| <b>1. PENDAHULUAN .....</b>                | <b>1</b>  |
| 1.1. Penemuan Sinar-X .....                | 2         |
| 1.2. Aplikasi di Bidang Kesehatan .....    | 6         |
| <b>2. HAKEKAT SINAR-X.....</b>             | <b>13</b> |
| 2.1. Sinar-X Bremsstrahlung .....          | 14        |
| 2.2. Gelombang Elektromagnetik .....       | 17        |
| 2.3. Radiasi Pengion .....                 | 21        |
| 2.4. Sinar-X Karakteristik .....           | 24        |
| 2.5. Panjang Gelombang Minimum .....       | 31        |
| <b>3. PEMBANGKIT SINAR-X.....</b>          | <b>34</b> |
| 3.1. Pesawat Sinar-X Modern.....           | 36        |
| 3.2. Pesawat Radiodiagnostik.....          | 40        |
| 3.3. Alat Percepat Partikel .....          | 44        |
| 3.4. Foton Energi Ultra Tinggi .....       | 48        |
| <b>4. RADIOLOGI DIAGNOSTIK.....</b>        | <b>51</b> |
| 4.1. Radiografi Umum .....                 | 52        |
| 4.2. Radiografi Anak.....                  | 58        |
| 4.3. Radiografi Gigi .....                 | 61        |
| 4.4. Pemindai Tomografi Terkomputasi ..... | 65        |
| 4.5. Pemeriksaan Kepadatan Tulang.....     | 69        |
| 4.6. Mamografi .....                       | 74        |
| 4.7. Fluoroskopi.....                      | 79        |
| <b>5. RADIOLOGI INTERVENSONAL .....</b>    | <b>83</b> |
| 5.1. Jenis-jenis Kegiatan .....            | 84        |
| 5.2. Pengambilan Sampel Jaringan .....     | 91        |
| 5.3. Fluoroskopi Intervensional .....      | 94        |

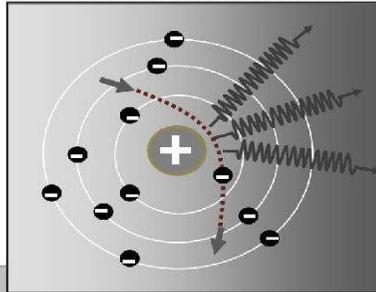
|           |                                 |            |
|-----------|---------------------------------|------------|
| 5.4.      | Kardiologi Intervensional ..... | 99         |
| 5.5.      | Angiografi.....                 | 104        |
| <b>6.</b> | <b>ONKOLOGI RADIASI.....</b>    | <b>111</b> |
| 6.1.      | Penanganan Kanker .....         | 112        |
| 6.2.      | Terapi Radiasi .....            | 117        |
| 6.3.      | Perkembangan Terkini.....       | 124        |
| <b>7.</b> | <b>PENELITIAN MEDIS.....</b>    | <b>131</b> |
| 7.1.      | Unsur Kelumit.....              | 132        |
| 7.2.      | Fluoresens Sinar-X.....         | 136        |
| 7.3.      | Pengembangan Obat-Obatan.....   | 141        |
| <b>8.</b> | <b>PENUTUP .....</b>            | <b>144</b> |
|           | DAFTAR PUSTAKA .....            | 148        |
|           | INDEKS .....                    | 158        |
|           | BIODATA PENULIS .....           | 162        |

## DAFTAR GAMBAR

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Proses terbentuknya sinar-X Bremsstrahlung.....   | 15 |
| Gambar 2.2 | Grafik sinusoidal untuk menggambarkan bentuk gelombang mekanik.....                                 | 19 |
| Gambar 2.3 | Proses pengionan materi oleh radiasi.....   | 23 |
| Gambar 2.4 | Model atom Rutherford-Bohr.....   | 26 |
| Gambar 2.5 | Spektrum energi sinar-X dari target molibdenum pada 35 kV .....                                     | 29 |
| Gambar 2.6 | Proses terbentuknya sinar-X karakteristik .....   | 30 |
| Gambar 2.7 | Pergeseran intensitas maksimum sinar-X Bremsstrahlung karena perubahan tegangan puncak tabung ..... | 32 |
| Gambar 3.1 | Proses pembangkitan sinar-X dengan tabung Coolidge.....   | 38 |
| Gambar 3.2 | Sistem pendinginan target pada pesawat sinar-X.....   | 40 |
| Gambar 3.3 | APS sebagai pembangkit sinar-X energi ultra tinggi .....  | 49 |
| Gambar 4.1 | Pembuatan gambar anatomi bagian dalam tubuh manusia dengan sinar-X.....                             | 54 |
| Gambar 4.2 | Pemanfaatan medium kontras untuk mempertajam gambar hasil pencitraan .....                          | 56 |
| Gambar 4.3 | Radiografi sinar-X untuk memastikan kasus <i>hydrocephalus</i> pada bayi yang baru lahir .....      | 61 |
| Gambar 4.4 | Hasil citra gigi dipakai sebagai alat bantu rencana pengobatan penyakit mulut .....                 | 62 |
| Gambar 4.5 | Pemindai CT untuk citra tomografi otak manusia .....  | 66 |
| Gambar 4.6 | Tulang dapat keropos karena penurunan kualitas dan kepadatan massa tulang .....                     | 70 |
| Gambar 4.7 | Deteksi dini kanker payudara dengan mamografi .....   | 77 |
| Gambar 4.8 | Pemeriksaan fluoroskopi untuk mengamati pergerakan organ tubuh secara langsung .....                | 80 |
| Gambar 5.1 | Angiografi untuk deteksi penyempitan pembuluh darah .....   | 90 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Gambar 5.2 | Biopsi untuk pengambilan sampel jaringan dalam tubuh .....                          | 91  |
| Gambar 5.3 | Fluoroskopi intervensional untuk memandu pergerakan alat dalam tubuh.....           | 96  |
| Gambar 5.4 | Radiologi intervensional dipakai untuk memandu pemasangan <i>stent</i> .....        | 102 |
| Gambar 5.5 | Angiografi untuk mencitrakan sistem aliran darah bagian otak .....                  | 108 |
| Gambar 5.6 | Angiografi ginjal untuk mendeteksi kelainan pembuluh darah ginjal.....              | 109 |
| Gambar 6.1 | Sel kanker yang tumbuh dan menyerang organ mata .....                               | 113 |
| Gambar 6.2 | Radioterapi untuk pengobatan kanker menggunakan radiasi pengion.....                | 123 |
| Gambar 6.3 | Teknik pisau gamma untuk radioterapi kanker otak.....                               | 128 |
| Gambar 7.1 | Kasus kriminal bisa diungkap melalui penemuan unsur kelumit dalam senjata api ..... | 135 |
| Gambar 7.2 | Prinsip analisis unsur kelumit dengan teknik XRF .....                              | 139 |

# 1



## PENDAHULUAN

Michael Faraday (1791-1867) merupakan ilmuwan yang begitu banyak memberikan kontribusinya terhadap pengembangan teori kelistrikan. Berkat teori yang disusunnya, listrik menjelma menjadi teknologi yang banyak dimanfaatkan dalam kehidupan. Karya-karyanya di bidang kelistrikan telah membuat Faraday dikenal dan dikenang oleh masyarakat dunia hingga saat ini. Karena jasa-jasanya dalam membuka banyak rahasia alam itulah, Faraday dinobatkan sebagai salah satu ilmuwan eksperimental besar sepanjang masa [1]. Bahkan Albert Einstein (1879-1955) menganggapnya sebagai salah satu dari beberapa ilmuwan yang memiliki pengaruh penting dalam sejarah perkembangan ilmu fisika. Untuk mengenang jasa-jasanya di bidang kelistrikan, namanya diabadikan untuk satuan nilai kapasitansi komponen listrik berupa kumparan (induktor) yang dinyatakan dalam Farad dan disingkat F [2].

Masih terkait dengan kepakaran di bidang kelistrikan dan elektrokimia, Faraday merupakan ilmuwan perintis dalam mempelajari sinar katoda, yaitu sinar bermuatan listrik negatif yang keluar dari katoda [3]. Penelitian ini didorong oleh keingintahuan Faraday mengenai pengaruh kelistrikan terhadap materi berbentuk gas. Sinar katoda merupakan topik penelitian yang sangat menarik perhatian para fisikawan pada akhir abad ke-19. Dalam kurun waktu pasca Faraday, penelitian sinar katoda itu tetap berlanjut dengan melibatkan banyak ilmuwan seperti

Heinrich Geissler (1814-1879), Julius Plucker (1801-1868), Johann W. Hittorf (1824-1914), Cromwell F. Varley (1828-1883), Sir William Crookes (1832-1919), Eugene Goldstein (1850-1931), Arthur F. Schuster (1851-1934), Philipp Eduard Anton Lenard (1862-1947), Georg H. Quincke (1834-1924) dan Heinrich Hertz (1857-1894).

Penelitian sinar katoda dilakukan menggunakan tabung sinar katoda, yaitu sebuah tabung gelas dari kaca yang kuat dengan panjang kira-kira 50 cm, diameter kedua ujungnya adalah 4 cm, dan dua keping elektroda logam dipasang masing-masing pada kedua ujung tabung tersebut. Kedua keping elektroda itu oleh Faraday diberi nama katoda dan anoda [3]. Dalam penelitian, katoda dan anoda yang berada di bagian luar tabung masing-masing dihubungkan dengan kutub negatif dan positif baterai listrik Galvani dengan nilai potensial listriknya mencapai ribuan Volt. Di antara kedua elektroda di bagian dalam tabung terdapat gas (udara) sehingga peristiwa lucutan udara dapat dipandang sebagai aliran muatan listrik melalui medium gas. Penelitian semacam ini mulai dilakukan oleh Faraday untuk pertama kalinya pada tahun 1838.

Kerja panjang para ilmuwan dalam penelitian sinar katoda yang telah berlangsung selama lebih dari 50 tahun itu akhirnya berhasil mengungkap beberapa karakteristik fisika sinar katoda [4]. Keberhasilan inilah yang memberi jalan bagi Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) menemukan sinar-X pada akhir tahun 1895. Keterlibatan Roentgen dalam penelitian sinar katoda dimulai sejak tahun 1894, sekitar 56 tahun setelah Faraday merintis penelitian ini untuk yang pertama kalinya. Selain penemuan sinar-X, penelitian sinar katoda juga memberi jalan bagi Joseph J. Thomson (1856-1940) menemukan elektron pada tahun 1897, selang dua tahun setelah penemuan sinar-X [5]. Sesuai dengan tujuan utama penulisan buku, yaitu tentang aplikasi Sinar-X di bidang kesehatan, maka dalam buku ini hanya dibahas mengenai pemanfaatan sinar-X saja, tanpa menyinggung sedikitpun masalah penemuan elektron.

### **1.1. Penemuan Sinar-X**

Salah satu fenomena yang menarik dan menjadi perhatian para peneliti sinar katoda adalah kemunculan nyala pendar kehijau-hijauan pada bagian ujung tabung yang posisinya berhadapan dengan katoda. Pada saat

sedang bekerja dengan tabung sinar katoda di laboratorium Universitas Wurzburg, Roentgen juga tertarik mengamati nyala kehijau-hijauan pada dinding tabung tersebut. Nyala hijau itu akhirnya diketahui bahwa sinar tersebut tak lain adalah gelombang cahaya yang dipancarkan oleh dinding kaca tabung. Para peneliti saat itu percaya bahwa pancaran cahaya itu muncul sebagai akibat dari interaksi antara sinar katoda dengan bagian dinding tabung yang posisinya berada di depan katoda.

Pada suatu malam tanggal 8 November 1895, dalam salah satu percobaan, Roentgen sengaja membungkus dengan cara merekatkan seluruh permukaan tabung sinar katoda dengan lembaran karton hitam yang cukup tebal. Hal ini dimaksudkan agar tidak akan ada cahaya tampak yang dapat keluar dari dalam tabung. Selanjutnya ia memadamkan semua lampu di laboratorium tempat eksperimennya berlangsung. Dalam suasana kegelapan itu, ketika Roentgen menyalakan sumber tegangan listrik tabung untuk penelitiannya, secara tak sengaja ia mengamati adanya pancaran seberkas cahaya redup yang muncul pada permukaan pelat barium platinosianida yang kebetulan terletak di meja penopang peralatan eksperimennya, berada pada jarak sekitar 90 cm dari tabung. Ketika dijauhkan dari tabung, pelat ternyata masih tetap berpendar. Cahaya redup itu bahkan masih tertangkap oleh pelat ketika posisinya digeser hingga jarak 2 meter dari tabung [6].

Pelat barium platinosianida adalah bahan fluoresens, yaitu bahan yang hanya dapat berpendar apabila padanya dijatuhkan seberkas cahaya. Namun ketika eksperimen itu sedang berlangsung, di laboratorium tidak ada sumber cahaya sama sekali, sementara dalam serangkaian penelitian sinar katoda yang telah dilakukan sebelumnya oleh Lenard membuktikan bahwa perjalanan berkas sinar katoda di udara tidak melebihi jarak beberapa centimeter saja. Jika sumber tegangan listrik dipadamkan, maka cahaya pendar pada pelat barium platinosianida pun ikut hilang. Di satu sisi Roentgen yakin bahwa sumber cahaya yang dapat memendarkan pelat itu pasti bukan sinar katoda. Namun di sisi lain ia juga belum tahu penyebab pasti yang memungkinkan peristiwa berpendaran pelat itu bisa terjadi.

Begitu lama Roentgen mencari dan merenungkan jawaban yang paling masuk akal mengenai fenomena aneh yang baru saja ditemui dalam

penelitiannya. Namun ia selalu terbentur pada tidak adanya penjelasan yang memadai berdasarkan pengetahuan teknis jenis sinar yang sudah dikenal pada saat itu. Roentgen akhirnya ber-teori bahwa gejala fluoresensi yang ia amati itu disebabkan oleh sejenis sinar baru yang tidak tampak dan belum dikenal pada saat itu. Karena tidak ada sumber sinar yang ditemukan di lokasi percobaan, Roentgen segera menyadari bahwa sejenis sinar yang tidak kelihatan telah muncul dari dalam tabung sinar katoda [3].

Dengan penuh rasa ingin tahu, sederet percobaan pun akhirnya dilakukan Roentgen untuk mencari tahu sumber pasti dari sinar yang tidak kasat mata itu. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan, ia akhirnya menemukan sumber asal sinar yang tidak kelihatan itu, yang ternyata datang dari suatu titik pada bagian dinding gelas tabung yang mengalami benturan dengan berkas sinar katoda [7]. Jadi sinar aneh itu muncul sebagai akibat dari terjadinya tumbukan antara berkas sinar katoda dengan atom-atom dalam dinding tabung. Pada saat yang bersamaan, berkas sinar itu merangsang atom pada kaca untuk mengeluarkan gelombang elektromagnetik yang panjang gelombangnya sangat pendek. Karena sebelumnya tidak pernah dikenal dan sifatnya masih misterius saat pertama kali ditemukan, maka sinar ini akhirnya diberi nama sinar-X. Namun untuk menghargai jasanya dalam proses penemuan sinar-X, maka seringkali sinar itu disebut juga sebagai sinar Roentgen.

Meski bukan merupakan orang pertama yang mengamati efek yang dapat ditimbulkan oleh sinar katoda, Roentgen dianggap sebagai penemu sinar-X karena ia merupakan orang yang pertama kali mempelajarinya. Tergalur oleh penemuan yang tidak sengaja itu, Roentgen menyisihkan penyelidikan-penyelidikan lain dan memusatkan perhatiannya pada penyelidikan sinar-X. Dalam mempelajari sinar yang baru ditemukan itu, Roentgen mendapatkan bahwa jika bahan yang tidak tembus oleh cahaya ditempatkan di antara tabung dan layar pendar platino sianida, maka intensitas perpendaran pada layar itu berkurang namun tidak hilang sama sekali [6].

Sinar yang ditemukan Roentgen ternyata dapat menembus lembaran kertas, kayu, logam tipis, dan tubuh manusia kecuali tulang. Ketebalan bahan yang berbeda akan menimbulkan intensitas pendar yang berbeda pula. Hal ini menunjukkan bahwa sinar itu dapat menerobos bahan yang

tidak tembus oleh sinar biasa (cahaya tampak). Di samping itu, Roentgen juga bisa melihat bayangan ruas-ruas tulang telapak tangannya dengan cara menempatkan telapak tangannya di antara tabung sinar katoda dan layar pendar. Ketika telapak tangan diterobos sinar-X, ruas-ruas tulang telapak tangan tampak seperti bayangan hitam di permukaan layar, dikelilingi bayangan jaringan lunak yang lebih mudah ditembus sinar-X sehingga menghasilkan bayangan lebih tipis [6].

Setelah bekerja keras selama sekitar enam hingga tujuh minggu, Roentgen akhirnya berhasil menemukan bukti-bukti baru tentang sinar-X, salah satunya adalah ketika sinar-X itu dijatuhkan pada selembur film fotografi, peristiwa itu dapat mengakibatkan terjadinya kehitaman permukaan akibat emulsi fotografi setelah film itu diproses secara kimia, sama seperti kehitaman permukaan film yang diakibatkan emulsi fotografi oleh cahaya tampak. Roentgen segera menyadari bahwa sinar-X yang ditemukannya dapat digunakan untuk membuat gambar bayangan sebuah objek pada film fotografi. Berbagai uji pembuatan gambar melalui teknik radiografi segera dilakukan, dan salah satu percobaan yang dilakukan dua minggu setelah penemuan sinar-X adalah dengan meminta istrinya sendiri, Anna Bertha Ludwig (1839-1919), menjadi objek pengambilan gambar [8]. Dengan memasang film fotografi di dalam kaset dan menempatkan tangan istrinya di antara kaset dan tabung sinar katoda, pada negatif film fotografi akhirnya tercetak ruas-ruas tulang telapak tangan Nyonya Roentgen yang memakai dua buah cincin. Orang mulai percaya pada penemuan sinar-X setelah Roentgen mempertontonkan hasil foto radiografi telapak tangan istrinya tadi kepada masyarakat luas.

Tanggal 8 November 1895 dicatat dalam sejarah perkembangan ilmu pengetahuan sebagai tanggal ditemukan sinar-X atau sinar Roentgen. Penemuan sinar ini akhirnya dicatat sebagai bagian dari perkembangan teknologi di bidang fisika [3]. Atas jasanya itu, berbagai penghargaan internasional diterima oleh Roentgen, seperti Rumford Medal dari Royal Society di London pada tahun 1896. Roentgen juga menerima medali dari Franklin Institute di Philadelphia dan medali dari kerajaan Italia.

Tahun 1901 hadiah Nobel mulai dianugerahkan untuk pertama kalinya kepada orang-orang yang memiliki karya dan jasa besar dalam kehidupan umat manusia. Dalam bidang fisika, orang pertama yang

beruntung mendapatkan penghargaan sangat bergengsi itu adalah Roentgen atas jasanya menemukan sinar-X pada saat usianya mencapai 50 tahun [6]. Berkat ketekunan, ketelitian dan kesabarannya, Roentgen berhasil mengungkap rahasia suatu jenis sinar tak kasat mata yang tidak pernah diketahui sama sekali sebelumnya. Penemuan besar itu memang layak dianugerahi hadiah Nobel Fisika karena prospek aplikasi sinar-X yang terbentang begitu luas untuk berbagai keperluan dalam kehidupan umat manusia. Pengakuan internasional itu diberikan kepada Roentgen enam tahun setelah penemuan sinar-X dipublikasikan.

## **1.2. Aplikasi di Bidang Kesehatan**

Percobaan demi percobaan dilakukan Roentgen dan baru pada tanggal 28 Oktober 1895 ia menyampaikan karya tulis ilmiahnya yang pertama tentang penemuan sinar-X itu pada perkumpulan Fisika Kedokteran di Wurzburg, Jerman, dengan harapan karya tulis itu dimuat dalam publikasi mereka [6]. Dalam makalahnya yang berjudul *On a New Kind of Ray; A Preliminary Communication* (Menuju Sinar Jenis Baru; Sebuah Komunikasi Awal), selain menerangkan asal-usul, Roentgen juga melaporkan cara menghasilkan dan menguraikan sebagian besar karakteristik sinar-X yang telah berhasil ia selidiki dan pelajari. Laporan itu dalam waktu singkat langsung menggugah perhatian di kalangan ilmuwan.

Setelah mengumumkan hasil temuannya, Roentgen melanjutkan penelitian mengenai daya tembus relatif sinar-X terhadap substansi lain yang berbeda-beda. Dari hasil penelitian ini ia menyiapkan karya tulisnya yang kedua tentang sinar-X. Dalam makalah keduanya Roentgen memaparkan penggunaan berbagai macam material sebagai target penyinaran. Ia menyimpulkan bahwa daya tembus sinar-X cukup bervariasi, bergantung pada kerapatan substansi target yang dilewatinya [6]. Inilah salah satu temuan penting dari hasil pengamatan Roentgen, yaitu kemampuan sinar-X menerobos materi yang tidak tembus cahaya. Dengan bantuan film fotografi, terbuka peluang untuk mencitrakan bagian dalam tubuh manusia melalui penyinaran dengan sinar-X.

Penemuan sinar-X menjadi tonggak penting bagi kelahiran dan perkembangan disiplin radiologi di bidang kedokteran [9]. Radiologi

merupakan salah satu cabang ilmu kedokteran yang berhubungan dengan masalah pemanfaatan radiasi untuk pencitraan guna menunjang pelayanan kesehatan. Melalui pengembangan radiologi, pemeriksaan tubuh menggunakan sinar-X telah berhasil menguak berbagai jenis penyakit yang sebelumnya dianggap masih merupakan misteri. Kegiatan ini dikenal dengan istilah radiodiagnostik, yang kemudian berkembang menjadi pencitraan diagnosis.

Membaca peluang aplikasi sinar-X dalam bidang kesehatan, tanggapan terhadap penemuan sinar-X akhirnya datang dari kalangan profesional. Di Amerika Serikat, Thomas Alva Edison (1847-1931) merupakan ilmuwan pertama yang menangkap peluang pemanfaatan sinar X untuk keperluan medis [10]. Dalam pencitraan diagnosis, Edison menyarankan penggunaan layar pendar sebagai pengganti film fotografi, sehingga para dokter bisa melihat hasil pemotretan tubuh secara langsung tanpa harus menunggu proses kimiawi pencucian film. Produksi pesawat sinar-X untuk tujuan komersial pun mulai dilakukan. Bulan Mei 1896, di Amerika Serikat mulai diteliti kemungkinan membuat perlengkapan pesawat sinar-X untuk keperluan pencitraan diagnosis.

Buku ini ditulis dalam rangka memperkenalkan pemanfaatan sinar-X yang begitu luas dalam bidang kesehatan. Namun sebelum menuju ke pokok bahasan, terlebih dahulu perlu adanya pemahaman yang baik tentang hakikat sinar-X. Seiring dengan perjalanan waktu, para peneliti berhasil mengungkap landasan fisika yang mendasari proses terbangkitkannya sinar-X. Berbagai karakteristik fisika yang menjadi dasar penting aplikasi sinar-X dalam bidang kesehatan juga berhasil diungkap. Bahasan mengenai hakikat sinar-X ini dapat ditemukan pada Bab 2. Pembahasan diawali dengan uraian mengenai fenomena fisika yang mendasari proses terbentuknya sinar-X agar pembaca mendapatkan gambaran tentang apa sebenarnya sinar-X itu. Ada dua jenis spektrum energi sinar-X yang terbentuk melalui dua proses fisika yang berbeda. Dalam bidang kesehatan, masing-masing memiliki manfaat yang berbeda.

Dalam perjalanan selanjutnya, para ilmuwan juga berhasil mendapatkan bukti ilmiah, bahwa sinar-X termasuk salah satu anggota dari spektrum gelombang elektromagnetik. Guna mendapatkan gambaran yang komprehensif tentang sinar-X, terutama yang berkaitan langsung dengan

sifatnya sebagai gelombang, maka pada bab 2 buku ini juga diuraikan tentang aspek fisika gelombang elektromagnetik yang berkaitan dengan besaran-besaran fisika untuk gelombang, terutama besaran frekuensi dan panjang gelombang. Pembahasan dilanjutkan ke masalah kuantum energi sinar-X yang memiliki kaitan langsung dengan kedua besaran tersebut.

Spektrum elektromagnetik dapat diuraikan menjadi beberapa jenis gelombang penyusunnya berdasarkan perbedaan frekuensi atau panjang gelombangnya. Melalui penguraian itulah sinar-X dapat dibedakan dari gelombang elektromagnetik jenis lainnya. Sinar-X ternyata memiliki karakteristik fisika yang spesifik, berbeda dengan sebagian besar radiasi elektromagnetik lainnya. Karakteristik spesifik itu adalah sifatnya sebagai radiasi pengion karena memiliki energi kuantum yang cukup besar sehingga mampu mengionkan materi yang dilaluinya. Energi kuantum itu ternyata juga mempunyai kaitan langsung dengan daya tembus sinar-X terhadap materi. Sifat sebagai radiasi pengion dan daya tembusnya yang tinggi inilah yang memungkinkan sinar-X dimanfaatkan dalam bidang kesehatan. Untuk melengkapi gambaran mengenai dua karakteristik spesifik ini, maka dalam bab 2 juga dibahas mengenai pengertian radiasi pengion, proses pengionan materi, serta daya tembus sinar-X terhadap materi.

Sinar-X memiliki lingkup aplikasi yang begitu luas dalam bidang kesehatan. Hal itu dimungkinkan karena hadirnya berbagai jenis pesawat pembangkit sinar-X. Pada mulanya, para praktisi kesehatan menemukan jalan pemanfaatan sinar-X untuk keperluan radiodiagnostik. Namun dalam perkembangan berikutnya diketahui, bahwa sinar-X ternyata dapat juga digunakan sebagai sarana pengobatan penyakit kanker yang kegiatannya dikenal dengan istilah radioterapi, dan kini lebih populer dengan sebutan onkologi radiasi. Selanjutnya, para ilmuwan juga mendapatkan jalan pemanfaatan sinar-X untuk penelitian medis dengan memanfaatkan sinar-X karakteristik maupun foton energi ultra tinggi. Karena itu, pembaca perlu mengenali berbagai jenis pesawat sinar-X yang dirancang untuk berbagai kegiatan yang berbeda-beda. Pembahasan mengenai masalah ini dapat ditemukan pada Bab 3. Di dalamnya diuraikan mengenai kehadiran pesawat sinar-X modern, pemanfaatan sinar-X untuk keperluan

radiodiagnostik, pesawat untuk keperluan radioterapi dan pembangkit foton energi ultra tinggi untuk penelitian medis.

Sampailah kita pada bagian pembahasan pemanfaatan sinar-X di bidang kesehatan. Pembahasannya dapat ditemukan dalam empat bab berturut-turut, mulai dari Bab 4 sampai dengan bab 7. Pada Bab 4 dibahas tentang pemanfaatan sinar-X untuk kegiatan radiologi diagnostik. Dalam bab ini dapat ditemukan bahasan mengenai radiografi umum dalam pemeriksaan kesehatan seperti foto toraks untuk pemeriksaan paru, penggunaan medium kontras untuk mempertajam hasil pencitraan, serta bahasan terkait radiografi umum lainnya.

Dalam Bab 4 dibahas pula mengenai radiografi anak yang pelaksanaannya jauh berbeda dengan radiografi umum untuk pasien dewasa. Bagian yang tak kalah penting adalah pembahasan mengenai radiografi gigi yang sudah begitu dikenal oleh kalangan masyarakat awam dan memiliki peran besar dalam perawatan kesehatan gigi. Masuk dalam wilayah radiologi diagnostik yang juga dibahas dalam Bab 4 ini adalah segala sesuatu yang berkaitan dengan masalah *Computed Tomography Scanner* atau lebih populer dengan singkatannya CT-Scan.

Masih berkaitan dengan kegiatan radiologi diagnostik, karakteristik sinar-X yang begitu mudah diserap oleh jaringan keras tubuh manusia seperti tulang membuat sinar ini begitu efektif dimanfaatkan untuk pemeriksaan kesehatan tulang. Dalam hal ini sinar-X secara luas dimanfaatkan untuk deteksi penyakit osteoporosis. Bahasan mengenai masalah ini juga dapat ditemukan dalam Bab 4. Selain masalah osteoporosis yang cenderung menyerang kalangan kaum wanita, masalah kesehatan lainnya yang mengancam kaum wanita adalah kanker payudara. Mamografi untuk deteksi dini kanker payudara dengan memanfaatkan sinar-X ternyata memiliki peran penting dalam perawatan kesehatan payudara bagi kaum wanita. Karena itu, masalah ini menjadi penting untuk melengkapi uraian mengenai radiologi diagnostik. Uraian dalam Bab 4 diakhiri dengan bahasan mengenai pemeriksaan fluoroskopi yang dapat dipakai untuk mengamati pergerakan organ tubuh secara langsung.

Dalam Bab 5 dibahas mengenai radiologi intervensional sebagai salah satu pencapaian terkini dalam pelayanan kesehatan. Perkembangan dalam bidang ini akhirnya melahirkan teknik bedah akses minimal atau

lebih dikenal dengan istilah *minimally invasive surgery*. Berbagai hal yang berkaitan dengan kegiatan radiologi intervensional diuraikan dalam bab ini. Masuk dalam wilayah kegiatan radiologi intervensional adalah biopsi, yaitu prosedur medis berupa tindakan diagnostik yang dilakukan dengan cara pengambilan sampel kecil dari jaringan tubuh atau sel. Tujuannya adalah untuk mendeteksi kelainan, termasuk ukuran dan bentuk fisik sampel.

Jika dalam pembahasan radiologi diagnostik pada Bab 4 ada pembahasan mengenai fluoroskopi untuk mengamati langsung pergerakan organ dalam tubuh, dalam pembahasan mengenai radiologi intervensional pada Bab 5 juga dapat ditemui pembahasan mengenai fluoroskopi intervensional yang digunakan untuk memantau pergerakan dan posisi kateter yang dimasukkan ke dalam pembuluh darah menuju lokasi pengamatan secara langsung. Kegiatan ini sering dilakukan pada pemeriksaan angiografi maupun studi gastrointestinal.

Dalam Bab 5 juga dibahas mengenai masalah kardiologi intervensional yang mempunyai peran penting dalam pemeriksaan dan perawatan jantung non-bedah. Melalui kegiatan ini dapat diketahui adanya kelainan anatomi jantung, penyempitan atau sumbatan dari pembuluh koroner, gangguan fungsi pompa jantung, dan sebagainya. Masuk dalam wilayah kegiatan radiografi intervensional adalah angiografi, yaitu aktivitas berbasis sinar-X untuk memeriksa pembuluh darah dalam tubuh termasuk jantung, otak, dan ginjal dengan bantuan zat kontras.

Pembahasan mengenai pemanfaatan sinar-X untuk pengobatan kanker yang lebih populer dengan nama onkologi radiasi dapat ditemukan pada bab 6. Pembahasannya diawali dengan hal-hal terkait perkembangan dan ancaman kanker bagi penduduk dunia. Dilanjutkan dengan pembahasan mengenai keniscayaan eradikasi sel-sel kanker dengan radiasi pengion. Sinar-X ternyata memiliki peran besar dalam pengobatan kanker. Radioterapi dengan sinar-X dimanfaatkan oleh para dokter untuk membantu pengobatan hampir pada semua jenis kanker.

Sebagai pendarang baru dalam pengobatan kanker, onkologi radiasi menjadi ilmu yang mandiri dan mampu berkolaborasi dengan metode pengobatan kanker lainnya yang sudah berkembang lebih dahulu, yaitu pembedahan dan kemoterapi. Radioterapi sering menjadi pilihan karena

beberapa keuntungan, misal pasien yang menjalani terapi radiasi dapat diperlakukan sebagai pasien rawat jalan. Karena itu, selama menjalani pengobatan dengan radioterapi, pasien tetap dapat bekerja atau melaksanakan aktivitas sosial sehari-hari seperti biasanya.

Dalam Bab 6 juga dapat ditemukan bahasan khusus mengenai perkembangan mutakhir pemanfaatan sinar-X untuk radioterapi dengan teknik pisau sinar-X (*X-knife*). Teknik ini banyak dimanfaatkan untuk pengobatan tumor otak dan gangguan lain dalam otak dengan menggunakan sinar-X tanpa harus melakukan pembedahan. Radioterapi dengan teknik pisau sinar-X merupakan pilihan pengobatan yang aman, akurat dan dapat diandalkan, terutama bagi pasien kanker otak yang karena kondisinya tidak mungkin menjalani terapi melalui operasi bedah otak.

Selain dapat dimanfaatkan untuk kepentingan radiodiagnosis dan radioterapi, sinar-X ternyata juga dapat dimanfaatkan untuk penelitian medis dan pengembangan obat-obatan. Jika kegiatan radiodiagnosis dan radioterapi lebih banyak memanfaatkan sinar-X Bremsstrahlung, penelitian medis lebih banyak memanfaatkan sinar-X karakteristik karena kemampuannya mendeteksi keberadaan unsur-unsur kelumit dalam tubuh manusia. Uraian mengenai masalah ini dapat ditemukan dalam Bab 7.

Pembahasan dalam Bab 7 diawali dengan uraian mengenai unsur kelumit, yaitu unsur atau elemen yang keberadaannya dalam suatu sampel memiliki konsentrasi rata-rata kurang dari 100 bagian per juta (*part per million, ppm*). Meski jumlahnya sangat kecil atau kadarnya sangat rendah, keberadaan unsur kelumit seringkali memiliki arti yang sangat penting bagi kesehatan manusia. Di satu sisi, ketiadaan unsur kelumit tertentu dalam tubuh ternyata dapat berdampak buruk pada kondisi kesehatan manusia. Sebaliknya, keberadaan beberapa jenis unsur kelumit tertentu juga bisa menimbulkan ancaman bagi kesehatan tubuh manusia.

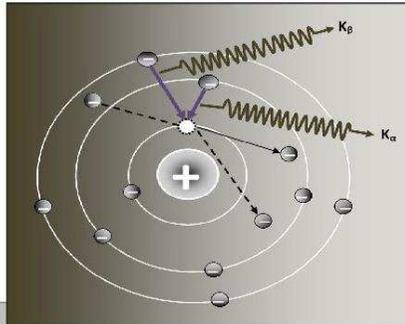
Pembahasan selanjutnya adalah mengenai teknik deteksi unsur kelumit. Keberadaan unsur-unsur kelumit penyusun tubuh ternyata sangat sulit untuk dianalisis baik secara kualitatif maupun kuantitatif dengan metode analisis kimia biasa. Pancaran sinar-X karakteristik ternyata dapat diandalkan untuk keperluan tersebut. Setiap atom dapat memancarkan sinar-X karakteristik dengan energi yang berbeda-beda, sehingga pancaran sinar-X karakteristik itu dapat dipakai untuk mengidentifikasi jenis atom

yang memancarkannya. Metode analisisnya dikenal dengan nama fluoresens Sinar-X atau *X-Ray Fluorescence* (XRF). Metode ini dapat dipakai untuk menentukan kandungan mineral-mineral kelumit dalam bahan biologis maupun dalam tubuh secara langsung dan sekali proses.

Uraian mengenai pemanfaatan sinar-X energi ultra tinggi untuk penelitian di bidang kesehatan juga dapat ditemukan dalam Bab 7. Dengan memanfaatkan sinar-X atau tepatnya foton berenergi ultra tinggi para peneliti mampu mengamati secara detail objek seukuran atom maupun molekul. Pengamatan hingga level ini sangat diperlukan untuk mengenali proses-proses kehidupan paling dasar secara lebih akurat dan menyeluruh. Para peneliti dapat mempelajari protein dan molekul biologis ukuran besar lainnya dengan resolusi tingkat atomik. Hasil pengamatan itu akan bermanfaat bagi bidang kimia maupun medis, misal untuk mengembangkan jenis-jenis obat baru. Binatang bersel satu seperti bakteri dapat dikenali secara lebih akurat sehingga dapat meningkatkan pengetahuan mengenai berbagai jenis penyakit serta cara pengobatannya.

Pembahasan dalam buku ini diakhiri dengan penutup yang disajikan dalam bab 8. Di dalamnya dikemukakan ringkasan hasil kerja dari sebuah perjalanan panjang yang telah ditempuh para ilmuwan, mulai dari saat penemuan hingga studi mengenai karakteristik fisika dalam rangka mengungkap hakikat sinar-X, dilanjutkan dengan penyajian informasi mengenai peran besar sinar-X dalam memberikan solusi terhadap masalah kesehatan dunia. Perjalanan panjang itu ternyata masih tetap berlanjut hingga saat ini. Semuanya ditujukan dalam rangka membuka misteri alam untuk kepentingan pengembangan ilmu pengetahuan yang bermanfaat bagi kemanusiaan.

# 2



## HAKEKAT SINAR-X

Pada bulan November 1896 Wilhelm C. Roentgen mempresentasikan makalahnya tentang penemuan sinar-X di depan pertemuan perkumpulan fisika kedokteran Universitas Wurzburg. Selain menerangkan asal-usul, ia juga melaporkan cara untuk menghasilkan dan menguraikan sebagian besar karakteristik sinar-X yang telah berhasil ia selidiki dan pelajari. Laporan mengenai penemuan itu dalam waktu singkat langsung menarik perhatian para ilmuwan. Pada tahun itu juga telah dilakukan cetak ulang terhadap publikasi Roentgen dengan maksud agar dapat diketahui oleh ilmuwan-ilmuwan lainnya. Dalam waktu yang tidak terlalu lama, makalah Roentgen telah diterjemahkan ke dalam bahasa Inggris, Perancis, Italia dan Rusia.

Roentgen melanjutkan penelitian mengenai daya tembus relatif sinar-X terhadap substansi lain yang berbeda-beda. Dari hasil penelitian ini ia menyiapkan karya tulisnya yang kedua tentang sinar-X. Tanggapan terhadap penemuan sinar-X datang dari berbagai penjuru dunia, di antaranya dari Columbia University di Amerika Serikat. Dalam waktu beberapa bulan dari saat pengumuman penemuan, ratusan ilmuwan ikut ambil bagian dalam penelitian sinar tersebut. Dalam kurun waktu sekitar satu tahun, 1000 kertas kerja tentang sinar-X menyusul diterbitkan. Suatu penghormatan datang dari Universitas Berlin. Perkumpulan ahli fisika

Berlin dalam memperingati hari ulang tahunnya yang ke-50 memamerkan hasil penemuan Roentgen di universitas tersebut [6].

Perkembangan penting berkaitan dengan penemuan Roentgen adalah keberhasilan para ilmuwan dalam mengungkap hakikat sinar-X [11]. Satu demi satu karakteristik fisika sinar-X berhasil dipelajari, mulai dari fenomena fisika yang mendasari proses terbentuknya sinar-X, perilaku sinar-X sebagai gelombang elektromagnetik, sifatnya sebagai radiasi pengion, serta penerapan teori kuantum untuk menyatakan besaran energi yang dimiliki sinar-X. Semua itu dapat dipakai untuk menjelaskan karakteristik fisika terpenting dari sinar-X, yaitu daya tembusnya terhadap materi yang sangat tinggi. Daya tembus inilah yang berperan sangat penting terkait dengan aplikasi sinar-X di bidang kesehatan.

Pengungkapan berbagai karakteristik fisika sinar-X oleh para ilmuwan pasca Roentgen telah mengantarkan kepada peningkatan pemahaman terhadap hakikat sinar-X. Dengan pemahaman yang baik itulah akhirnya mengantarkan manusia mendapatkan jalan untuk memanfaatkan sinar-X, salah satunya adalah dalam bidang kesehatan. Dalam Bab 2 ini dibahas berbagai hal tentang sinar-X agar pembaca mendapatkan gambaran yang komprehensif mengenai hakekat sinar-X.

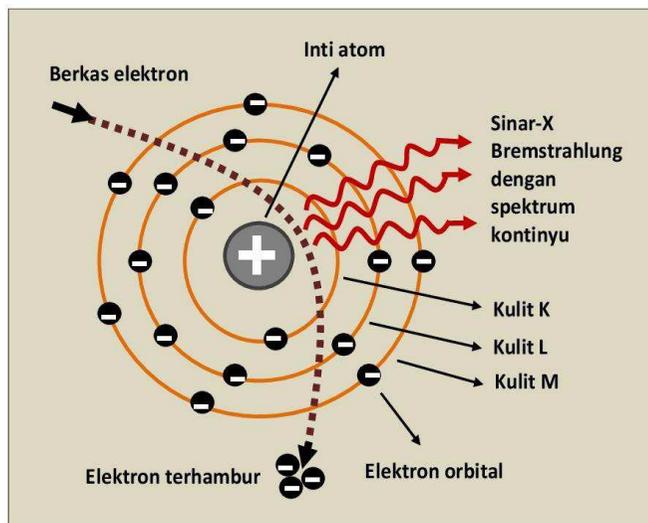
### **2.1. Sinar-X Bremsstrahlung**

Tidak lama setelah penemuan sinar-X, para fisikawan akhirnya mengetahui bahwa sinar itu dapat dihasilkan apabila elektron yang bergerak dengan kecepatan sangat tinggi menabrak atom suatu bahan. Dalam kasus penemuan sinar-X yang pertama kali diamati Roentgen, sinar itu terbentuk karena berkas elektron (sinar katoda) tiba-tiba berinteraksi dengan atom-atom penyusun dinding tabung yang berada di depan katoda [12]. Jadi metode terpenting dalam produksi sinar-X adalah mengupayakan percepatan gerak elektron dengan mengoperasikan tabung Crookes pada tegangan tinggi.

Dalam kurun waktu berikutnya, para ilmuwan akhirnya berhasil mengungkap latar belakang fenomena fisika yang mendasari proses terjadinya sinar-X. Metode terpenting dalam produksi sinar-X adalah proses yang dikenal dengan istilah Bremsstrahlung, yaitu kosakata dalam bahasa Jerman yang berarti radiasi pengereman (*braking radiation*). Sinar

katoda yang terdiri atas berkas elektron bergerak dalam tabung dengan kecepatan sangat tinggi. Apabila berkas elektron yang bermuatan negatif (-) itu melintas mendekati inti atom yang bermuatan positif (+), maka gaya tarik elektrostatis yang kuat dari inti atom akan menyebabkan lintasan gerak elektron membelok dengan tajam seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Pembelokan arah gerak elektron akan menyebabkan perubahan momentum karena berkurangnya kecepatan elektron tersebut. Sedangkan perubahan momentum itu akan diikuti oleh hilangnya sebagian energi kinetik elektron. Sebagai konsekuensi dari hukum kekekalan energi, pengurangan kecepatan yang menyebabkan penurunan energi kinetik akan diimbangi oleh munculnya energi dalam bentuk lain sebagai hasil konversi dari sebagian energi kinetik elektron yang hilang. Dalam peristiwa ini, sebagian energi kinetik yang hilang itu ternyata berubah menjadi energi lain dalam bentuk foton elektromagnetik [13]. Karena peristiwa pembelokan arah gerak itu, maka dari bahan yang ditabrak elektron akan terpancarkan foton elektromagnetik dalam bentuk sinar-X. Peristiwa ini merupakan fenomena fisika paling awal dari inti atom yang dikenal manusia [3].



Gambar 2.1 Proses terbentuknya sinar-X Bremsstrahlung [13]

Dikaitkan dengan keadaan inti atom di mana sinar-X terbentuk, total Bremsstrahlung per inti atom kira-kira berbanding dengan  $(Z/m)^2$ , dengan  $Z$  adalah nomor atom bahan target dan  $m$  adalah massa partikel bermuatan. Karena bergantung dengan faktor  $(1/m)^2$ , maka jumlah Bremsstrahlung dapat diabaikan keberadaannya untuk semua partikel kecuali elektron. Karena harga  $m$  untuk elektron sangat rendah, maka nilai  $(1/m)^2$  sangat tinggi sehingga probabilitasnya untuk membangkitkan Bremsstrahlung menjadi sangat besar [14].

Efisiensi produksi sinar-X Bremsstrahlung ternyata juga sangat bergantung pada nilai  $Z$  bahan target. Bahan dengan  $Z$  tinggi menghasilkan lebih banyak sinar-X Bremsstrahlung dibandingkan bahan dengan  $Z$  rendah. Untuk berkas elektron yang datang menuju target tipis, fraksi dari energi elektron yang diubah menjadi sinar-X Bremsstrahlung ( $f$ ) adalah sebagai berikut [14]:

$$f \approx 7 \times 10^{-4} Z E_k \quad (2-1)$$

dengan  $Z$  adalah nomor atom bahan penyerap (target) dan  $E_k$  adalah energi kinetik berkas elektron (dalam Mega elektron-Volt, MeV). Berdasarkan persamaan (2-1), maka berkas elektron berenergi 1 MeV akan kehilangan sekitar enam persen energinya dan berubah menjadi sinar-X jika berkas tersebut diserap oleh timbal (Pb dengan  $Z = 82$ ). Namun titik leleh timbal ternyata sangat rendah sehingga tidak dapat dipakai sebagai bahan target dalam tabung sinar-X. Fraksi Bremsstrahlung yang terbentuk menjadi kecil apabila berkas elektron diserap oleh bahan bernomor atom rendah. Fraksi energi kinetik elektron yang berubah menjadi sinar-X hanya 0,4 persen jika diserap oleh target dari bahan aluminium (Al dengan  $Z = 13$ ).

Meskipun efisiensi diusahakan setinggi mungkin, namun untuk pesawat sinar-X pada umumnya, ternyata kurang dari satu persen energi elektron yang dapat diubah menjadi sinar-X, sedang sisanya muncul sebagai panas. Oleh karena itu, target harus dibuat dari bahan yang memiliki titik leleh sangat tinggi dan harus mampu dengan baik pengaliran panas yang timbul. Karena dibatasi oleh nilai  $Z$  dan ketahanan terhadap panas (titik leleh), maka tidak semua jenis logam cocok dijadikan sebagai

bahan target untuk membangkitkan sinar-X. Saat ini, jenis bahan dengan nilai  $Z$  tertinggi yang ketahanan panasnya juga tinggi dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan target dalam tabung sinar-X adalah logam W dengan  $Z = 74$  yang titik lelehnya  $3360^{\circ}\text{C}$ .

Sinar-X yang terbangkitkan dari proses penembakan elektron terhadap dinding kaca tabung Crookes memiliki panjang gelombang jauh lebih pendek dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya tampak, berada di luar wilayah panjang gelombang yang dapat diamati oleh sistem indera penglihatan manusia. Meski tidak dapat diamati secara langsung, sinar-X dapat diketahui keberadaannya karena dapat memendarkan beberapa jenis bahan seperti barium platinosianida.

## **2.2. Gelombang Elektromagnetik**

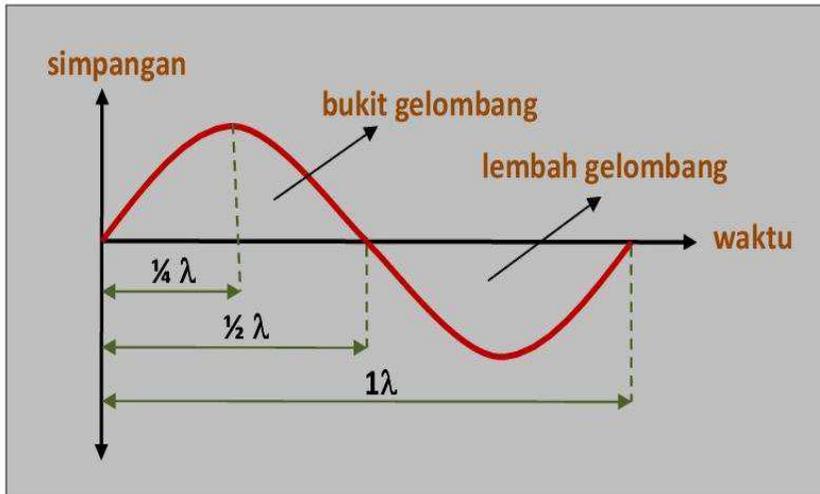
Pada saat-saat paling awal melakukan penelitian, Roentgen berhasil mengamati bahwa sinar-X ternyata tidak dibelokkan baik oleh medan listrik maupun medan magnet. Karena itu, Roentgen dan para ilmuwan sezamannya langsung menyadari bahwa sinar-X berbeda dengan sinar katoda yang saat itu menjadi objek penelitian kalangan fisikawan. Namun karena saat itu informasi mengenai aspek fisika sinar-X belum begitu lengkap, maka muncullah persaingan antara teori partikel dan teori gelombang untuk menjelaskan esensi atau substansi sinar-X [15]. Teori partikel dikemukakan antara lain oleh sepasang fisikawan Inggris yang terdiri atas seorang ayah bernama William H. Bragg (1862-1942) dan anaknya bernama William L. Bragg (1890-1971). Sedang teori gelombang dikemukakan antara lain oleh matematikawan dan fisikawan Anglo-Irlandia Sir George Stokes (1819-1903) dan fisikawan Inggris Charles G. Barkla (1877-1944).

Salah satu sifat dari gelombang adalah dapat mengalami hamburan [2]. Tahun 1665, matematikawan dan fisikawan Italia Francesco Grimaldi (1618-1683) memperlihatkan bahwa arah rambat gelombang cahaya tampak dapat berbelok dan memancar melebar jika melewati celah sempit yang berperan sebagai penghalang atau pengganggu arah rambatnya. Grimaldi menamakan peristiwa pembelokan itu dengan sebutan difraksi cahaya. Peristiwa difraksi dapat terjadi pada semua jenis gelombang, baik gelombang mekanik maupun elektromagnetik semacam cahaya.

Eksperimen mengenai sifat gelombang dari sinar-X telah dilakukan oleh Barkla. Dari hasil eksperimennya itu ia percaya bahwa sinar-X merupakan gelombang seperti halnya cahaya. Fisikawan Jerman Max von Laue (1879-1960) mengawali pekerjaannya dengan menuliskan hasil pemikiran teoritisnya yang mengacu pada hasil penelitian Barkla. Sebuah eksperimen kemudian dirancang oleh Laue bersama dua mahasiswanya, Walter Friedrich (1883-1968) dan Paul Knipping (1883-1935). Inilah percobaan mengenai difraksi sinar-X yang pertama kali dilakukan dan hasilnya ternyata dapat mendemonstrasikan validitas hipotesis Laue.

Difraksi merupakan proses hamburan sinar-X oleh bahan kristal. Pada tahun 1912, Laue bersama mahasiswanya berhasil membuktikan bahwa sinar-X dapat memperlihatkan salah satu sifat gelombang elektromagnetik, yaitu mengalami difraksi, sama seperti yang diperlihatkan oleh cahaya tampak, namun frekuensinya jauh lebih tinggi [16]. Fenomena difraksi sinar-X oleh kristal yang dipelajari Laue dapat dipakai untuk memastikan bahwa sinar-X adalah sejenis atau bagian dari gelombang elektromagnetik seperti halnya cahaya. Laue berargumentasi, ketika sinar-X melewati sebuah kristal, atom-atom pada kristal akan bertindak sebagai kisi-kisi difraksi, layaknya kisi-kisi difraksi yang dapat dipakai untuk menguraikan gelombang cahaya.

Pembahasan mengenai gelombang elektromagnetik menjadi sangat penting dalam kaitannya dengan upaya memahami hakikat fisika sinar-X. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang sinar-X, marilah kita pahami dengan baik terlebih dahulu mengenai teori gelombang elektromagnetik ini. Ada beberapa besaran fisika yang terkait dengan gelombang elektromagnetik, di antaranya yang paling dasar dan sering digunakan dalam pembahasan fisika gelombang adalah panjang gelombang, frekuensi, periode dan cepat rambat gelombang. Besaran dan satuan dasar untuk menyatakan gelombang elektromagnetik sama seperti besaran dan satuan dasar yang berlaku untuk gelombang mekanik pada umumnya. Suatu gelombang mekanik dapat divisualkan dalam bentuk gambar grafik sinusoidal yang tersusun atas bukit dan lembah gelombang seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik sinusoidal untuk menggambarkan bentuk gelombang mekanik [2]

Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa satu gelombang penuh atau lebih sering dinyatakan sebagai satu panjang gelombang yang diberi lambang  $\lambda$  (lambda), terdiri atas satu bukit dan satu lembah gelombang. Dalam sistem satuan internasional (SI), satuan untuk  $\lambda$  adalah meter (m). Namun satuan-satuan panjang yang lainnya juga sering digunakan, seperti: Angstrom, A ( $1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$ ), mikrometer,  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ), nanometer, nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) dan picometer, pm ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ).

Gelombang perdefinisi adalah perpindahan energi dari suatu tempat ke tempat lain. Perjalanan energi ini tentu saja memerlukan waktu. Dalam pembahasan mengenai gelombang dikenal adanya periode yang dilambangkan dengan T, yaitu waktu yang diperlukan gelombang untuk merambat menempuh jarak satu panjang gelombang penuh ( $1\lambda$ ). Suatu gelombang juga memiliki frekuensi yang diberi lambang  $\nu$  (nu), yaitu jumlah gelombang penuh yang terbentuk setiap detik. Satuan yang digunakan untuk  $\nu$  adalah seperdetik ( $\text{s}^{-1}$ ) atau Hertz (Hz). Karena satu gelombang penuh ditempuh dalam waktu T, maka diperoleh hubungan antara  $\nu$  dan T sebagai berikut:

$$v = \frac{1}{T} \text{ atau } T = \frac{1}{v} \quad (\text{i})$$

Cepat rambat gelombang didefinisikan sebagai jarak yang ditempuh persatuan waktu tempuh. Untuk menempuh jarak satu panjang gelombang ( $1\lambda$ ) diperlukan waktu tempuh satu periode ( $1T$ ), sehingga cepat rambat gelombang dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (\text{ii})$$

Substitusi persamaan (i) ke persamaan (ii) diperoleh persamaan baru untuk menyatakan cepat rambat gelombang elektromagnetik sebagai berikut:

$$C = v \lambda \quad (2-2)$$

Untuk semua jenis gelombang elektromagnetik, cepat rambatnya di ruang hampa ternyata sama dengan cepat rambat cahaya yang nilainya  $3 \times 10^8$  m/s. Nilai itu setara dengan 300.000 km/s. Karena kecepatannya sama, maka jenis-jenis gelombang elektromagnetik biasanya diklasifikasikan dan dikenali dari perbedaan panjang gelombang atau frekuensinya. Kedua besaran itu saling berhubungan dalam bentuk berbanding terbalik. Kenaikan frekuensi suatu gelombang akan diimbangi oleh penurunan panjang gelombangnya, demikian pula sebaliknya.

Gelombang elektromagnetik terdiri atas berbagai macam jenis gelombang dengan daerah frekuensinya yang sangat luas, mulai dari 10 hingga  $10^{22}$  Hz [2]. Kumpulan dari berbagai jenis gelombang elektromagnetik ini membentuk spektrum elektromagnetik. Kini diketahui bahwa cahaya ternyata hanyalah merupakan sebagian pita sempit dari keseluruhan pita spektrum gelombang elektromagnetik yang cukup lebar. Panjang gelombang cahaya tampak dari warna merah hingga ungu terbatas dari sekitar 0,008 mm hingga 0,004 mm atau dari frekuensi sekitar  $4 \times 10^{14}$  Hz hingga  $7,89 \times 10^{14}$  Hz.

Jika dibuat daftar gelombang elektromagnetik dengan urutan dari frekuensi paling rendah (panjang gelombang tinggi) ke frekuensi tinggi

(panjang gelombang pendek), maka diperoleh kelompok-kelompok gelombang elektromagnetik sebagai berikut [17]:

- Gelombang radio dengan frekuensi antara  $10^4$  sampai  $10^7$  Hz.
- Gelombang TV dengan frekuensi sedikit lebih tinggi dibandingkan gelombang radio.
- Gelombang radar (*radio detection and ranging*) yang masih tergolong gelombang radio dengan frekuensi sekitar  $10^{10}$  Hz.
- Sinar infra merah dengan frekuensi antara  $10^{11}$  sampai  $10^{14}$  Hz.
- Cahaya tampak dengan spektrum yang sempit, yaitu dalam daerah kepekaan retina mata manusia. Jika diuraikan lebih lanjut, cahaya tampak tersusun atas warna-warna dengan frekuensi (dinyatakan dalam Tera Hertz atau THz,  $1\text{THz} = 10^{12}$  Hz) masing-masing sebagai berikut: merah (405-463 THz), jingga (463-513 THz), kuning (513-521 THz), hijau (521-606 THz), biru (606-674 THz), nila (674-707 THz), dan ungu (707-749 THz).
- Sinar ultra violet dengan frekuensi antara  $10^{15}$  sampai  $10^{16}$  Hz.
- Sinar-X dengan frekuensi antara  $10^{16}$  sampai  $10^{20}$  Hz.
- Sinar gamma dengan frekuensi antara  $10^{20}$  sampai  $10^{25}$  Hz, merupakan jenis gelombang elektromagnetik dengan frekuensi terbesar.

### 2.3. Radiasi Pengion

Radiasi dalam terminologi fisika pada dasarnya adalah suatu cara perambatan energi dari sumbernya ke lingkungan sekitar tanpa melalui medium. Karena gelombang elektromagnetik membawa sejumlah energi yang dipancarkan dari sumber ke lingkungan sekitar tanpa memerlukan medium, maka proses pancaran energi elektromagnetik tersebut juga sering dikenal dengan istilah radiasi elektromagnetik [2]. Dalam kaitannya dengan proses pengionan, penggunaan istilah radiasi elektromagnetik lebih tepat digunakan dibanding istilah gelombang elektromagnetik.

Secara garis besar, kumpulan gelombang yang membentuk spektrum elektromagnetik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok berdasarkan pada kemampuannya dalam mengionkan materi yang dilaluinya. Kedua kelompok itu adalah radiasi bukan pengion (non-pengion) dan radiasi pengion [18]. Radiasi non-pengion didefinisikan sebagai penyebaran atau

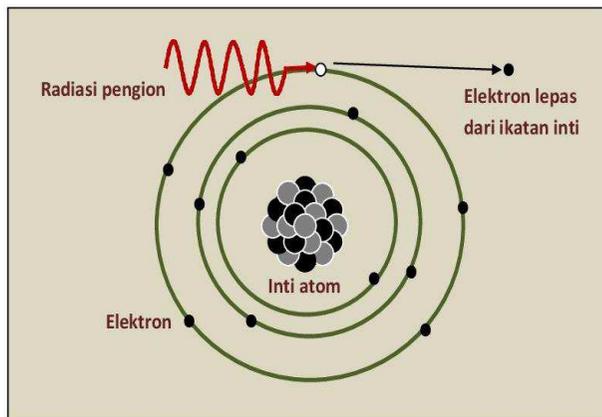
emisi energi yang apabila melalui suatu medium dan terjadi proses penyerapan energi, berkas radiasi tersebut tidak akan mampu menginduksi terjadinya proses pengionan pada medium yang dilaluinya. Suatu radiasi dikategorikan sebagai non-pengion apabila energi kuantum yang dimilikinya lebih rendah dari 10 elektron Volt (eV), atau setara dengan frekuensi tertinggi sebesar  $10^{15}$  Hz. Semakin rendah frekuensi, semakin rendah pula energi yang dimiliki radiasi tersebut.

Masuk dalam kelompok radiasi non-pengion adalah gelombang radio, gelombang TV, gelombang radar, sinar infra merah, cahaya tampak dan sinar ultra violet. Energi radiasi tertinggi pada kelompok ini dimiliki oleh sinar ultra violet. Namun karena energi tersebut masih lebih rendah dibandingkan dengan energi ikat elektron yang berasal dari inti atom, maka sinar ultra violet tidak mampu melepaskan elektron dari ikatan inti pada atom tersebut, sehingga tidak memicu terjadinya proses pengionan materi.

Radiasi pengion adalah kelompok radiasi yang mampu mengionkan materi yang dilaluinya. Proses pengionan terjadi jika radiasi yang memiliki cukup energi bertumbukan dengan atom-atom bahan penyusun materi. Ketika radiasi berinteraksi dengan atom, maka energi dari radiasi yang datang akan ditransfer kepada elektron orbital dalam atom bahan. Ikatan elektron di dalam orbit suatu atom timbul karena adanya gaya tarik elektrostatis antara elektron yang bermuatan negatif dengan inti atom yang bermuatan positif. Gaya tarik elektrostatis tersebut relatif lemah sehingga elektron mudah terlepas dari ikatan inti atom. Karena menyerap energi radiasi, maka elektron orbital itu memiliki energi yang cukup untuk melawan gaya ikat inti. Sebagai akibatnya, elektron dapat melepaskan diri dari ikatan inti.

Elektron adalah partikel penyusun atom yang bermuatan listrik negatif. Pada mulanya atom berada dalam keadaan netral atau tidak bermuatan listrik. Namun karena ada elektron yang melepaskan diri dari ikatan inti atom, maka atom yang kehilangan elektron itu menjadi bermuatan listrik positif. Peristiwa ini disebut sebagai pengionan, sedang radiasi yang dapat memicu proses pengionan pada materi disebut radiasi pengion. Proses pengionan materi oleh radiasi adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Istilah ion digunakan untuk mendefinisikan atom atau partikel yang bermuatan listrik. Muatan listrik dari satu buah elektron disebut muatan elementer ( $e$ ), nilainya adalah  $1,6022 \times 10^{-19}$  Coulomb (C). Karena terjadi proses pengionan, maka pada materi yang dilalui radiasi akan terbentuk pasangan ion positif dan ion negatif. Jika elektron terlepas dari suatu atom, maka terbentuklah pasangan ion berupa elektron bebas yang bermuatan negatif (ion negatif) dan atom yang kehilangan elektron sehingga bermuatan positif (ion positif).



Gambar 2.3 Proses pengionan materi oleh radiasi [18]

Proses pengionan menyebabkan elektron mudah berpindah dari atom yang netral, atau sebaliknya sebuah atom netral dapat memperoleh tambahan elektron bebas. Muatan listrik dari suatu atom bergantung pada jumlah elektron yang terlepas atau yang diperoleh. Misal dari suatu atom terlepas dua buah elektron, maka atom tersebut membentuk ion positif dengan muatan listrik dua muatan elementer ( $+2e$ ). Sebaliknya jika atom tersebut mendapatkan tambahan tiga buah elektron, maka atom membentuk ion negatif dengan muatan listrik tiga muatan elementer ( $-3e$ ). Apabila memiliki energi yang mencukupi, kedua jenis ion juga dapat memengaruhi atom lain sehingga terjadi pengionan lagi, dan seterusnya. Proses pengionan yang terjadi secara terus menerus sehingga jumlah ion yang terbentuk semakin besar sering dinamai dengan proses avalans (*avalanche*).

Dari sekian banyak jenis gelombang elektromagnetik, hanya sinar-X dan sinar gamma yang merupakan radiasi pengion [18]. Kedua sinar ini mempunyai sifat fisika yang hampir sama. Perbedaannya adalah terletak pada frekuensi dan panjang gelombangnya. Panjang gelombang sinar-X berkisar antara  $10^{-9}$  sampai  $10^{-6}$  cm, sedang panjang gelombang sinar gamma jauh lebih pendek dibandingkan sinar-X, yaitu berkisar antara  $10^{-11}$  sampai  $10^{-8}$  cm bergantung pada energinya. Perbedaan lainnya antara sinar-X dan sinar gamma adalah terletak pada sumber kedua sinar tersebut. Sinar-X dibangkitkan melalui pesawat sinar-X, sedang sinar gamma dipancarkan langsung oleh inti atom radioaktif.

Panjang gelombang sinar-X berada pada daerah antara 100 – 0,01 Å. Gelombang yang lebih panjang berada dekat dengan pita gelombang sinar ultra violet dan dikenal sebagai sinar-X lunak (*soft X-ray*). Gelombang yang lebih pendek berada berdekatan dan tumpang tindih dengan daerah sinar gamma, dan dinamakan sinar-X keras (*hard X-ray*). Campuran sinar-X dari berbagai panjang gelombang yang berbeda dikenal sebagai sinar-X putih (*white X-ray*), sebagai kebalikan dari sinar-X monokromatik yang hanya terdiri dari satu jenis panjang gelombang saja [18].

#### **2.4. Sinar-X Karakteristik**

Pada bagian 2.1 telah dibahas mengenai proses terbentuknya sinar-X Bremsstrahlung. Namun pancaran sinar-X Bremsstrahlung bukanlah satu-satunya peristiwa yang dapat timbul ketika elektron berinteraksi dengan atom secara keseluruhan. Peristiwa yang dialami elektron di dalam atom ternyata cukup kompleks. Interaksi elektron bebas dalam atom itu ternyata tidak hanya terjadi dengan intinya saja, melainkan bisa juga terjadi dengan elektron-elektron orbital yang mengelilingi kulit atom.

Pada bagian 2.4 ini akan dibahas lebih lanjut mengenai fenomena fisika yang dapat terjadi apabila berkas elektron bebas berenergi kinetik tinggi berinteraksi dengan elektron orbital pada kulit atom. Agar diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pola interaksi yang dapat terjadi, maka pembahasan pada bagian ini diawali dengan memperkenalkan model atom terkini terlebih dahulu.

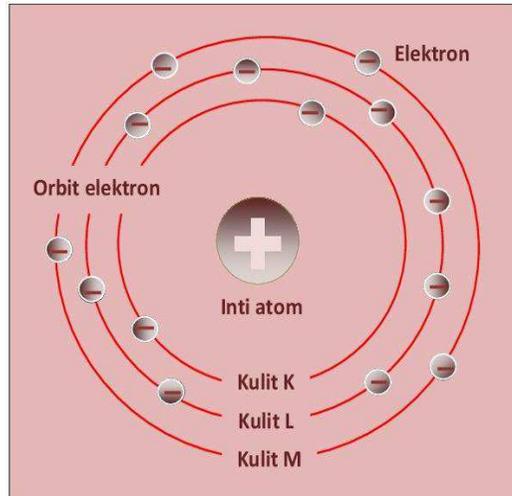
Model atom adalah suatu gambaran rekaan tentang atom yang dibuat berdasarkan hasil eksperimen maupun kajian teoretis, karena para ilmuwan belum tahu pasti seperti apakah bentuk atom yang sebenarnya. Sebagai gambaran hasil rekaan, maka perkembangan model atom selalu memperlihatkan suatu pola keteraturan yang berkembang menuju kesempurnaan, mengikuti kelengkapan data-data eksperimen terbaru yang diperoleh para ilmuwan, sesuai dengan tingkat perkembangan perangkat teknologi untuk mempelajarinya. Teori atom mutakhir yang kini disepakati secara luas oleh kalangan ilmuwan menggambarkan bahwa bangunan sebuah atom adalah menyerupai bola yang tersusun atas kulit dan inti atom [19].

Model atom modern yang kini disepakati oleh kalangan ilmuwan merupakan sumbangan hasil pemikiran dari fisikawan teori asal Denmark, Niels Henrik Bohr (1885-1962) yang dikemukakan pada 1913. Bohr mengajukan model atomnya berdasarkan teori kuantum untuk menjelaskan spektrum gas hidrogen. Spektrum garis menunjukkan bahwa elektron hanya menempati tingkat-tingkat energi tertentu dalam atom [19].

Bohr menyatakan bahwa atom ternyata mirip dengan sistem tata surya, dengan elektron-elektron mengitari inti atom seperti halnya planet-planet mengitari matahari. Dengan alasan yang sama bahwa sistem tata surya tidak runtuh karena tarikan gravitasi antara matahari dan tiap planet yang mengelilinginya, atom juga tidak runtuh karena tarikan elektrostatis gaya Coulomb antara inti atom dengan tiap elektron yang mengelilinginya. Dalam kedua kasus ini, gaya tarik berperan memberikan percepatan sentripetal yang dibutuhkan untuk mempertahankan gerak edar elektron tanpa adanya kehilangan energi.

Meskipun teori atom Bohr gagal dalam menerangkan spektrum atom yang lebih rumit, namun teori ini merupakan langkah maju ke depan, dan untuk sumbangan ini Bohr memenangkan Hadiah Nobel Bidang Fisika pada tahun 1922 [1]. Meski masih memiliki beberapa kelemahan, namun untuk mendapatkan gambaran sederhana mengenai atom, model atom Rutherford-Bohr dewasa ini telah diterima secara luas. Dalam model ini digambarkan bahwa atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif dan kulit atom dengan sejumlah elektron bermuatan negatif yang bergerak mengelilingi inti atom melalui lintasan-lintasan tertentu. Oleh Bohr

lintasan-lintasan elektron itu dinamai kulit K, kulit L, kulit M dan seterusnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Model atom Rutherford-Bohr [20]

Dalam studi tentang sinar-X, nama Charles G. Barkla dikenal sebagai fisikawan yang merintis eksperimen mengenai hamburan sinar-X. Dari hasil eksperimennya itu ia berhasil membuktikan bahwa sinar-X merupakan salah satu jenis gelombang elektromagnetik. Dalam salah satu penelitian, Barkla menemukan fenomena baru yang tidak diduga sebelumnya, dan temuannya itu ternyata memiliki perang penting dalam riset fisika sinar-X yang dilakukan dalam kurun waktu berikutnya. Jika sinar-X berinteraksi dengan berbagai jenis bahan, apakah dalam bentuk padat, cair maupun gas, maka dari bahan itu akan dipancarkan radiasi sekunder [21]. Fenomena ini sebetulnya telah diamati oleh fisikawan Perancis Georges Sagnac (1869-1928) pada 1897, yang kemudian dipelajari dan menjadi objek penelitian panjang kalangan ilmuwan generasi sesudahnya.

Profesor Barkla dari Universitas Edinburg telah melakukan penelitian fundamental dan melelahkan untuk mengetahui asal-usul radiasi sekunder itu. Dalam hal ini ia menemukan bahwa radiasi sekunder yang dipancarkan bahan setelah ditembak dengan sinar-X (radiasi primer) terdiri

atas dua jenis radiasi yang sangat berbeda antara yang satu dengan lainnya. Salah satu radiasi itu berupa partikel dengan karakteristik sama seperti sinar katoda, yang selanjutnya dikenal sebagai pancaran elektron. Sedangkan jenis radiasi kedua memiliki karakteristik sama seperti sinar-X. Untuk selanjutnya, jenis radiasi yang kedua ini sementara kita sebut sebagai sinar-X sekunder.

Barkla telah melakukan deretan panjang penelitian yang sangat cermat mengenai asal-usul kedua jenis radiasi tersebut. Perhatian khusus diarahkan kepada jenis radiasi kedua (sinar-X sekunder). Barkla menemukan adanya dua jenis sinar-X yang berbeda pada kelompok radiasi sekunder [6]. Salah satu jenis sinar-X itu memiliki koefisien serapan yang sama dengan sinar-X primer yang ditembakkan ke bahan. Sinar itu juga memiliki daya tembus sama seperti sinar-X primer. Karena itu, ada cukup bukti untuk menyatakan bahwa kualitas sinar itu sama dengan sinar-X primer, sehingga sinar itu pasti merupakan bagian dari sinar-X primer yang berdifusi dan berhasil menerobos bahan.

Intensitas sinar-X yang berdifusi ternyata cukup beragam bergantung pada perbedaan arah datangnya sinar-X primer. Melalui pengukuran distribusi intensitas radiasi yang berdifusi, Barkla mampu menentukan total emisi sinar-X dari berbagai jenis bahan pada berbagai kondisi. Salah satu temuan terpenting Barkla adalah hasil kerjanya yang memungkinkan ia dapat memperkirakan jumlah elektron yang terkandung di dalam atom bahan.

Komponen sinar-X sekunder yang kedua adalah jenis sinar dengan karakteristik sangat berbeda dengan sinar-X primer. Barkla mengamati bahwa radiasi ini cukup homogen, koefisien serapannya tidak bergantung pada radiasi primer, tetapi bergantung pada jenis bahan yang ditembak. Selanjutnya ia membuat temuan penting yang menjelaskan bahwa karakter sinar-X sekunder itu hanya bergantung pada kualitas atau jenis atom yang terkandung dalam bahan, tanpa bergantung pada komposisi kimia bahan. Setiap unsur kimia yang berbeda menghasilkan radiasi sekunder yang spesifik untuk unsur itu sendiri.

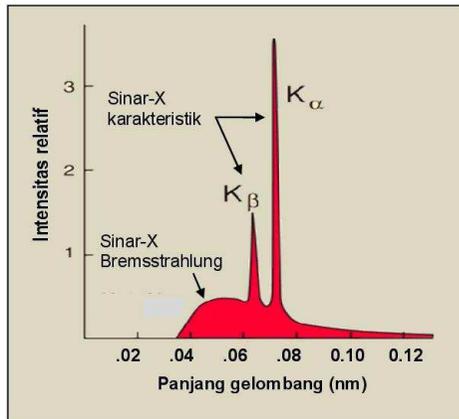
Barkla menyebut radiasi sekunder jenis kedua ini sebagai sinar-X karakteristik. Sinar itu ternyata memiliki sifat yang sangat berbeda baik dengan sinar-X primer maupun radiasi yang berdifusi (sinar-X sekunder

jenis pertama). Sinar-X karakteristik cukup homogen, dapat dibedakan dari radiasi jenis lainnya, dan dari penelitian itu Barkla dapat mengasosiasikan pancaran sinar-X karakteristik dengan jenis bahan yang dijadikan objek penelitiannya.

Berbeda dengan radiasi yang berdifusi, intensitas sinar-X karakteristik tidak bergantung pada arah datang radiasi primer yang dipakai untuk menembak bahan, melainkan menyebar secara merata pada semua arah. Karena sinar-X karakteristik dibangkitkan dari sinar-X primer, maka terjadinya pancaran sinar-X karakteristik harus diawali dengan adanya penyerapan energi sinar-X primer oleh bahan terlebih dahulu. Karena itu, Barkla melakukan investigasi yang sangat hati-hati mengenai penyerapan energi sinar-X oleh berbagai jenis bahan. Hasilnya adalah bahwa berbagai faktor seperti kerapatan, temperatur dan komposisi kimia bahan tidak memiliki pengaruh penting terhadap pancaran sinar-X karakteristik. Hanya kualitas dari atom bahan itu saja yang menentukan jumlah penyerapan energi.

Berdasarkan hasil penelitian Barkla, selain sinar-X Bremsstrahlung seperti diuraikan pada bagian 2.1, ada juga jenis sinar-X lain yang disebut sinar-X karakteristik. Berbeda dengan sinar-X Bremsstrahlung yang spektrum energinya kontinyu, sinar-X karakteristik memiliki spektrum energi diskrit berupa puncak-puncak pancaran yang sangat tajam. Adanya dua jenis sinar-X itu menyebabkan munculnya dua macam spektrum energi sinar-X, yaitu spektrum kontinyu yang lebar untuk Bremsstrahlung dan dua buah atau lebih garis tajam untuk sinar-X karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Barkla dianugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada 1917 atas penemuannya tentang karakteristik radiasi sinar-X dari unsur-unsur [6]. Sinar-X Bremsstrahlung dihasilkan dari interaksi antara elektron bebas dengan inti atom, sedang sinar-X karakteristik dihasilkan karena terjadinya transisi elektron dari orbit dengan tingkat energi yang lebih tinggi menuju ke orbit lain dengan tingkat energi yang lebih rendah. Transisi itu begitu spesifik bergantung pada jenis atomnya dan sinar-X yang dipancarkan dapat dipakai untuk mencirikan atau mengidentifikasi atom yang memancarkannya.



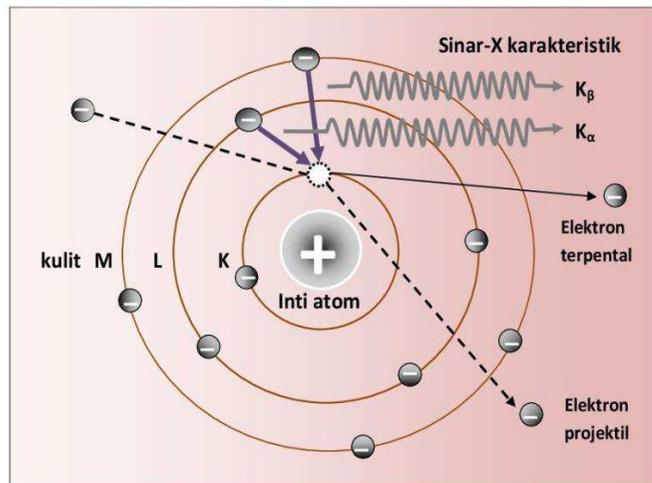
Gambar 2.5 Spektrum energi sinar-X dari target molibdenum pada 35 kV [22]

Mengingat semua kulit terdalam suatu atom selalu terisi penuh oleh elektron, maka transisi elektron di dalam atom tidak akan pernah terjadi dalam keadaan normal. Transisi itu baru bisa terjadi jika ada pemicu dari luar yang dapat mementalkan elektron sehingga keluar dari orbit terdalam (kulit K). Dalam kasus penelitian Barkla, elektron terpentak karena menyerap energi foton sinar-X yang menyinari bahan. Namun dalam kurun waktu berikutnya, para ilmuwan mengetahui bahwa ada cara lain yang dapat dipakai untuk mementalkan elektron pengisi orbit terdalam suatu bahan.

Selain penyinaran dengan sinar-X sebagaimana dilakukan oleh Barkla, ada cara lain untuk memicu terjadinya transisi elektron, salah satunya adalah menembaki atom dengan berkas elektron yang dipercepat hingga memiliki energi kinetik cukup memadai untuk mementalkan elektron orbital keluar dari kulit terdalam. Usaha ini memerlukan tegangan pemercepat hingga 10.000 Volt. Karena dipercepat dengan beda potensial yang tinggi, maka berkas elektron yang ditembakkan menuju target memiliki energi kinetik yang cukup tinggi. Energi itu cukup untuk mementalkan elektron-elektron orbital yang terikat kuat pada orbit terdalam atom target. Jika elektron pada orbit terdalam terpentak keluar, maka elektron pada orbit dengan tingkat energi yang lebih tinggi akan bertransisi ke orbit dengan tingkat energi lebih rendah yang kebetulan kosong.

Karena ada perbedaan tingkat energi orbit elektron, maka transisi elektron tersebut akan disertai dengan pelepasan kelebihan energi dalam bentuk pancaran radiasi elektromagnetik [23]. Mengingat beda energi antara tingkat-tingkat orbit dalam atom target cukup besar, maka radiasi yang dipancarkannya memiliki frekuensi yang cukup besar dan berada pada daerah sinar-X. Energi sinar-X yang terbentuk melalui proses transisi elektron besarnya sama dengan selisih energi antara kedua tingkat energi elektron orbital tersebut. Karena setiap jenis atom memiliki tingkat-tingkat energi orbit elektron yang berbeda-beda, maka sinar-X yang terbentuk dari transisi elektron ini menunjukkan karakteristik dari atom target, sehingga disebut sinar-X karakteristik.

Adakalanya sinar-X karakteristik terjadi karena elektron atom yang berada pada kulit K terpental keluar. Kekosongan kulit K ini segera diisi oleh elektron dari kulit di atasnya. Jika kekosongan pada kulit K diisi oleh elektron dari kulit L, maka akan dipancarkan sinar-X karakteristik  $K_{\alpha}$ . Jika kekosongan itu diisi oleh elektron dari kulit M, maka akan dipancarkan sinar-X karakteristik  $K_{\beta}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Karena setiap atom memancarkan sinar-X karakteristik dengan energi yang berbeda-beda, maka energi sinar-X karakteristik yang dipancarkan itu dapat dipakai untuk mengidentifikasi jenis atom yang memancarkannya.



Gambar 2.6 Proses terbentuknya sinar-X karakteristik [24]

## 2.5. Panjang Gelombang Minimum

Banyak aspek berhubungan dengan pemanfaatan sinar-X, salah satunya adalah aspek fisika terkait dengan panjang gelombang sinar-X. Pemahaman aspek fisika ini penting ditinjau dari sisi teknis karena hampir semua besaran fisika yang melekat pada sinar-X akan menentukan kualitas hasil kerja yang melibatkan sinar tersebut. Karena membawa sejumlah energi kuantum yang dikenal juga dengan foton, maka gelombang elektromagnetik sering juga disebut sebagai foton elektromagnetik [25]. Energi kuantum foton elektromagnetik berbanding terbalik dengan panjang gelombangnya ( $\lambda$ ). Semakin pendek nilai  $\lambda$ , semakin besar nilai E gelombang tersebut.

Untuk sinar-X, nilai  $\lambda$  ini sangat berpengaruh terhadap kemampuan atau daya tembusnya terhadap materi. Semakin kecil nilai  $\lambda$  atau semakin besar nilai E, akan semakin besar daya tembus sinar-X terhadap materi. Karena itu, pengaturan energi memiliki peran penting dalam aplikasi sinar-X di berbagai bidang kehidupan sehari-hari. Daya tembus dari sinar-X itulah yang diandalkan dalam berbagai kegiatan radiografi, baik di bidang medis maupun industri.

Energi sinar-X akan mencapai maksimum jika  $\lambda$ -nya mencapai nilai terpendek atau panjang gelombang minimum ( $\lambda_{\min}$ ). Pada pesawat sinar-X, energi maksimum keluaran pesawat ( $E_{\max}$ ) akan sama dengan energi kinetik elektron yang dipercepat dalam tabung (W). Hubungan antara panjang gelombang sinar-X ( $\lambda$ , dalam meter) dengan tegangan operasi tabung dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut [26]:

$$\lambda_{\min}(\text{m}) = \frac{12,42}{V} 10^{-7} \quad (2-3)$$

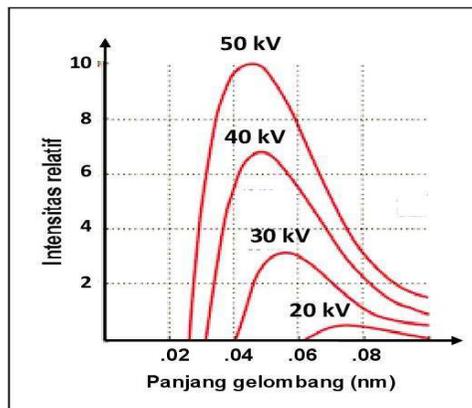
Jika panjang gelombang dinyatakan dalam Angstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), maka dari persamaan (2-3) dapat diperoleh persamaan baru untuk menyatakan  $\lambda_{\min}$  sebagai berikut [26]:

$$\lambda_{\min}(\text{A}) = \frac{12,42}{V} 10^3 \quad (2-4)$$

Dalam hal ini  $\lambda_{\min}$  adalah panjang gelombang untuk mendapatkan sinar-X berenergi maksimum dari mempercepat elektron dengan beda potensial  $V$ . Jika nilai  $V$  ditingkatkan, maka sinar-X dengan energi lebih tinggi dapat diperoleh. Intensitas tertinggi sinar-X yang dihasilkan akan terjadi kira-kira pada posisi  $1,5 \lambda_{\min}$  untuk porsi spektrum kontinyu. Untuk elektron yang dipercepat dalam beda potensial  $10.000 \text{ V}$ ,  $\lambda_{\min}$  yang dihasilkannya berada pada rentang beberapa puluh nanometer (nm) [26].

Pada tegangan tabung yang rendah, daya tembus sinar-X yang dihasilkan juga rendah karena nilai  $\lambda_{\min}$  nya cukup besar. Karena itu, kemampuan sinar-X dalam menerobos ruang antara atom atau molekul juga sangat rendah. Pada kondisi ini, sebagian besar sinar-X akan terserap oleh dinding gelas tabung. Untuk menghindari penyerapan ini, maka pada tabung sinar-X tegangan rendah seringkali digunakan jendela berilium tipis untuk memperkecil kehilangan sinar-X karena penyerapan oleh dinding tabung.

Berdasarkan persamaan (2-3) atau (2-4), perubahan tegangan operasi tabung (kVp) pesawat akan mengakibatkan pergeseran nilai  $\lambda_{\min}$  sinar-X yang dipancarkan. Semakin besar nilai kVp yang digunakan, akan semakin kecil  $\lambda_{\min}$  sinar-X yang dipancarkan, sehingga terjadi pergeseran posisi intensitas tertinggi spektrum sinar-X Bremsstrahlung yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.

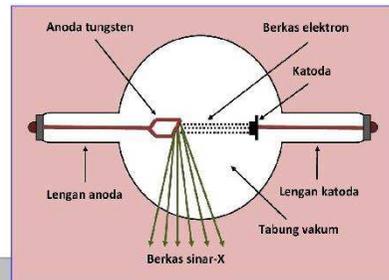


Gambar 2.7 Pergeseran intensitas maksimum sinar-X Bremsstrahlung karena perubahan tegangan puncak tabung [27]

Besaran fisika sinar-X yang akan terpengaruh oleh perubahan nilai kVp adalah frekuensi dan panjang gelombang sinar-X. Dalam hal ini frekuensi suatu gelombang selalu berbanding terbalik dengan panjang gelombangnya. Semakin besar kVp (berarti semakin besar juga energi sinar-X yang dihasilkan) akan semakin besar frekuensi atau semakin pendek panjang gelombang sinar-X yang dihasilkan.

Ketika kVp diperbesar, energi sinar-X yang dihasilkan semakin besar dan panjang gelombangnya semakin kecil. Ukuran panjang gelombang foton elektromagnetik akan memengaruhi daya tembus sinar-X terhadap materi. Semakin pendek panjang gelombang, semakin tinggi daya tembusnya terhadap materi. Foton elektromagnetik dengan panjang gelombang yang sangat pendek mampu menerobos ruang antar atom suatu materi. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan sinar-X dengan daya tembus tinggi, diperlukan pesawat sinar-X yang dioperasikan pada kVp tinggi.

# 3



## PEMBANGKIT SINAR-X

Publikasi besar-besaran penemuan sinar-X akhirnya menarik perhatian kalangan ilmuwan dan profesional. Segera setelah penemuan sinar-X, para profesional berupaya untuk menyempurnakan unjuk kerja pesawat pembangkitnya. Pesawat sinar-X adalah alat atau perangkat yang digunakan untuk memproduksi atau membangkitkan sinar-X. Tabung sinar-X dalam bentuk tabung sinar katoda yang pertama kali digunakan untuk membangkitkan sinar-X beroperasi pada tegangan masih relatif rendah. Salah satu upaya penyempurnaan pesawat sinar-X ditempuh dengan cara menyempurnakan desain dan unjuk kerja tabung sinar-X.

Ada deretan perbaikan desain dan unjuk kerja seiring dengan peningkatan kemampuan teknis dalam pembuatan tabung sinar katoda. Saat pertama kali digunakan oleh Faraday, tabung sinar katoda masih berupa tabung gelas tertutup yang dilengkapi dengan dua keping elektroda (katoda dan anoda) pada masing-masing ujung tabung. Penyempurnaan desain tabung pertama kali dilakukan oleh Faraday sendiri, yaitu dengan memasang pompa penghisap untuk mengupayakan agar tekanan gas di dalam tabung bisa diturunkan. Pada tahun 1854, Heinrich Geissler (1814-1879), ahli gelas sekaligus fisikawan Jerman, berhasil menyempurnakan pompa penghisap yang dipasang pada tabung sinar katoda serta perbaikan daya tempel katoda dan anodanya pada dinding tabung. Lahirlah Tabung Geissler dengan unjuk kerja lebih baik dibanding tabung generasi sebelumnya [3].

Penyempurnaan tabung sinar katoda berikutnya dilakukan oleh ahli kimia dari Inggris Sir William Crookes (1832-1919). Pada awal tahun 1879, Crookes berhasil mengembangkan tabung dengan tingkat kevakuman terbaik yang dapat dicapai untuk kondisi saat itu. Lahirlah Tabung Crookes berupa tabung kaca berbentuk kerucut terpancung. Salah satu ujung yang menjadi tempat di mana katoda terpasang berdiameter lebih kecil, sementara ujung lainnya yang berhadapan dengan posisi katoda berdiameter lebih besar. Pada saat pertama kali ditemukan, sinar-X dibangkitkan melalui tabung Crookes seperti ini.

Unjuk kerja pesawat pembangkit sinar-X yang mempekerjakan tabung Crookes ternyata masih terbatas. Keinginan untuk mengoperasikan tabung pada tegangan yang lebih tinggi telah mendorong perlunya rancangan tabung baru yang lebih sempurna. Upaya penyempurnaan pesawat sinar-X masih terus berlangsung hingga kini. Dari berbagai upaya itu lahirlah pesawat sinar-X modern dengan unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan pesawat generasi sebelumnya. Pesawat sinar-X modern mampu beroperasi pada tegangan sangat tinggi sehingga menghasilkan berkas elektron yang bergerak sangat cepat. Jika tegangan tabung dinaikkan, semakin tinggi pula kecepatan gerak elektron menuju anoda, sehingga energi sinar-X yang dipancarkan dari anoda juga semakin tinggi.

Saat ini, proses pembangkitan sinar-X tidak lagi mengandalkan mekanisme kerja tabung Crookes, melainkan dengan menggunakan pesawat sinar-X modern. Sebuah pesawat sinar-X pada prinsipnya terdiri atas tabung hampa dan variasi rangkaian elektronik yang saling terpisah. Secara umum, pesawat sinar-X modern mempunyai sumber elektron (filamen panas), sistem pemercepat gerak elektron dan target di mana elektron itu nantinya ditabrakkan. Pesawat dilengkapi pula dengan perangkat dan fasilitas lainnya sedemikian rupa sehingga pengoperasiannya memberikan manfaat yang optimal dengan tingkat keselamatan yang prima [28]. Melalui berbagai upaya penyempurnaan, lahirlah berbagai jenis tabung sinar-X modern yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kegiatan. Berikut ini akan dikupas teknik-teknik modern yang saat ini dipakai sebagai dasar untuk membangkitkan sinar-X.

### 3.1. Pesawat Sinar-X Modern

Pesawat sinar-X modern untuk tujuan komersial akhirnya hadir di tengah masyarakat. Bulan Mei 1896, para pakar kelistrikan di Amerika Serikat mulai meneliti mengenai kemungkinan membuat perlengkapan pesawat sinar-X untuk tujuan komersial. Umumnya tabung sinar-X modern beroperasi menggunakan sistem anoda putar. Pakar kelistrikan memperkenalkan koil induksi yang mampu memutar target agar tumbukan berkas elektron lebih merata pada semua bagian permukaan target. Teknik ini dapat dipakai untuk memperpanjang umur target. Perusahaan *American General Electric Company* pada musim gugur 1896 mulai memproduksi tabung sinar-X dengan target berputar jenis itu.

Dalam perjalanan, para profesional menemui berbagai kendala teknis dalam mendesain pesawat sinar-X. Semula mereka memanfaatkan logam platinum tipis sebagai bahan target pada tabung sinar-X generasi awal. Di dalam tabung, hampir semua energi elektron dilepas sebagai panas saat bertumbukan dengan target. Karena titik lelehnya rendah, target platinum mudah meleleh ketika ditembak dengan elektron. Karena itu, harus ada penambahan massa bahan target agar lebih tahan terhadap panas sekaligus untuk mencegah pelelehan. Namun ada kenyataan lain yang memunculkan permasalahan baru, di mana target platinum yang lebih besar akan menambah biaya pembuatan tabung [29].

Untuk mengatasi masalah pelelehan, para ilmuwan menemukan jalan baru melalui penggantian bahan target dari platinum dengan logam tungsten atau wolfram (W). Meski target dari bahan baru ini lama kelamaan juga akan mengalami kerusakan, terutama pada bagian yang paling sering tertembak elektron, namun proses kerusakan yang terjadi tidak secepat seperti yang dialami oleh target platinum. Bersamaan dengan berkembangnya pemanfaatan pesawat sinar-X dalam kehidupan sehari-hari, tumbuh pula industri pesawat pembangkit sinar-X beserta peralatan, perlengkapan dan suku cadangnya. Bersamaan dengan itu terbit pula buku-buku pedoman untuk penanganan serta perawatan pesawat sinar-X.

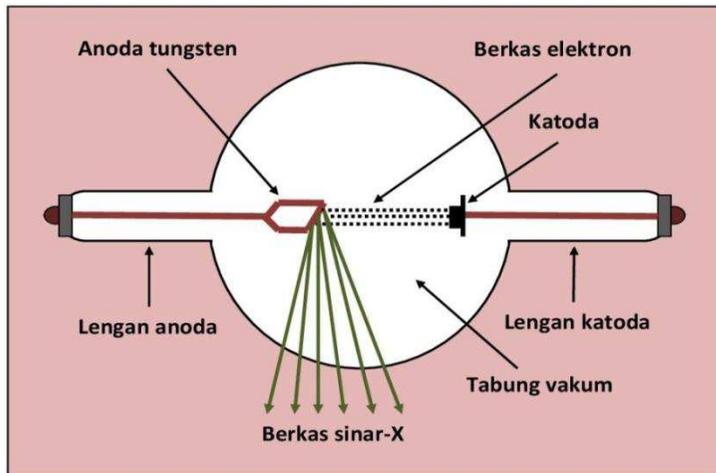
Sebagai bahan katoda biasanya digunakan filamen kawat tungsten berbentuk melingkar seperti spiral. Filamen dilengkapi alat pemusat elektron (*focusing cup*), bagian ujungnya dipasang pada bidang cekung untuk memfokuskan elektron menuju daerah sempit pada target. Meskipun

efisiensi sudah diusahakan setinggi mungkin, namun untuk pesawat sinar-X pada umumnya, kurang dari satu persen energi elektron yang dapat diubah menjadi sinar-X, sedang sisanya muncul sebagai panas. Oleh karena itu, target harus dibuat dari bahan dengan titik leleh sangat tinggi.

Di Amerika Serikat, Thomas Alva Edison (1847-1931) merupakan ilmuwan pertama yang menangkap peluang pemanfaatan sinar X untuk keperluan medis [8]. Dalam kegiatan radiodiagnostik, Edison menyarankan penggunaan layar pendar sebagai pengganti film fotografi, sehingga para dokter bisa melihat hasil pemotretan tubuh secara langsung tanpa harus menunggu proses kimiawi pencucian film. Setelah meneliti dan menguji coba hampir 2.000 jenis bahan untuk layar pendar, Edison akhirnya menemukan bahwa bahan layar pendar yang paling baik digunakan adalah *calcium tungstates*. Bahan itu bisa memberikan hasil pencitraan lebih terang dibandingkan dengan barium platinosianida yang digunakan oleh Roentgen pada awal penemuan sinar-X.

Pada pesawat modern, tabung sinar-X ditempatkan dalam suatu tempat khusus yang disebut rumah atau wadah tabung (*tube housing*), di mana dinding bagian luarnya biasanya terbuat dari metal, sedang dinding bagian dalamnya terbuat dari lapisan timbal (Pb) atau uranium susut kadar yang dilapisi logam [29]. Fungsi dinding adalah untuk menghindari terjadinya kebocoran paparan radiasi sinar-X yang tidak dikehendaki. Celah atau lubang pada wadah tabung tidak boleh lebih besar dari yang diperlukan untuk menghasilkan berkas sinar-X dengan ukuran maksimum.

Penyempurnaan tabung pembangkit sinar-X berikutnya dilakukan pada tahun 1913 oleh fisikawan Amerika William David Coolidge (1873-1975). Tabung hasil karyanya disebut tabung Coolidge. Tabung jenis ini sangat vakum dan di dalamnya dipasang katoda berbentuk filamen yang dibuat dari kawat pijar. Tabung Coolidge pada prinsipnya merupakan tabung vakum termionik dengan katodanya memancarkan elektron secara langsung karena mengalami pemanasan oleh aliran listrik yang stabil. Elektron yang dipancarkan dari filamen panas dipercepat menuju ke arah anoda menggunakan tegangan tinggi di sepanjang tabung seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Proses pembangkitan sinar-X dengan tabung Coolidge [21]

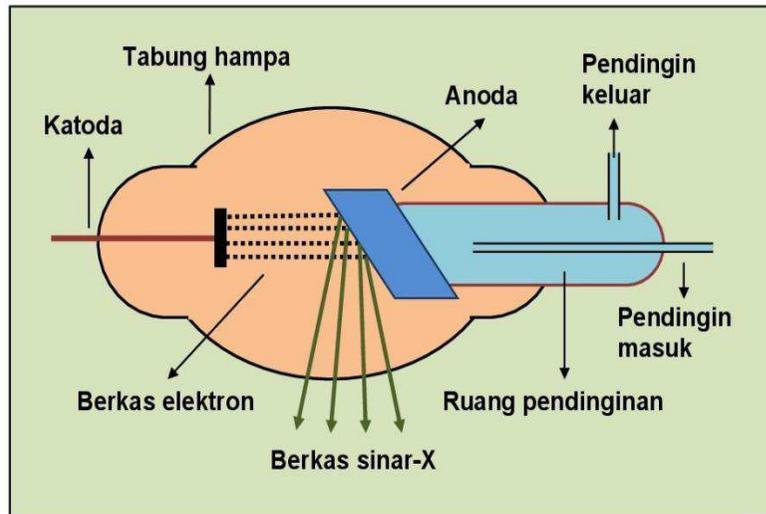
Sebagian besar tabung sinar-X yang beroperasi dewasa ini menggunakan model tabung Coolidge yang sudah dimodifikasi. Tabung itu dibuat dari kaca pyrex hampa udara sehingga tekanan di dalamnya sangat rendah. Tabung berfungsi sebagai rumah bagi dua elektroda, masing-masing berperan sebagai filamen pemancar elektron (katoda) dan target logam berat yang berperan sebagai pemancar sinar-X (anoda). Keduanya perlu ditempatkan dalam ruang hampa agar perjalanan elektron menuju target berlangsung tanpa hambatan, dan proses pembangkitan sinar-X dapat berlangsung sempurna.

Sumber daya pada pesawat sinar-X terdiri atas sumber tegangan rendah untuk filamen dan sumber tegangan tinggi untuk memberi tegangan antara katoda dan anoda (antara filamen dan target). Untuk menyuplai arus pada filamen, transformator penurun tegangan digunakan sehingga dapat diperoleh tegangan 12 Volt AC dan arus listriknya dapat bervariasi hingga beberapa Ampere. Sedang untuk memberi tegangan di dalam tabung, digunakan transformator penaik tegangan tinggi hingga mencapai kondisi yang diperlukan untuk mengoperasikan pesawat sinar-X, biasanya berkisar pada daerah antara 5.000 Volt hingga beberapa juta Volt bergantung pada tujuan penggunaannya.

Pada saat arus listrik dihidupkan, filamen akan mengalami pemanasan dengan temperatur di atas  $2000^{\circ}\text{C}$  sehingga kelihatan berwarna putih karena terbentuknya awan elektron pada permukaannya. Dalam kondisi seperti ini filamen siap memancarkan elektron (sinar katoda). Jumlah elektron bebas yang dapat terpancar dari permukaan filamen bergantung pada tegangan yang diberikan ke filamen. Elektron selanjutnya ditarik dan dipercepat gerakannya melalui ruang hampa menggunakan tegangan listrik sangat tinggi. Elektron itu selanjutnya diarahkan menuju target logam W. Ketika elektron menabrak target, maka sinar-X akan terpancar dari permukaan target. Permukaan target membentuk sudut dengan kemiringan 45 derajat untuk mendapatkan fokus efektif agar sinar-X yang keluar dari tabung menjadi terarah. Target juga dilengkapi dengan bidang fokus (*focal spot*).

Pada saat mencapai target, elektron akan mengalami beberapa kemungkinan tumbukan dengan atom target. Adakalanya sebagian besar energi elektron hilang dalam bentuk panas, sebagian energi lainnya berubah menjadi energi foton sinar-X, namun ada pula kemungkinannya semua energi kinetik elektron diubah menjadi energi foton sehingga dihasilkan sinar-X dengan energi maksimum. Karena itu, energi sinar-X yang dipancarkan dari permukaan target berkisar dari nilai paling rendah hingga mencapai energi tertinggi apabila semua energi elektron itu hilang dalam satu kali tumbukan saja [20].

Mengingat sebagian besar energi elektron berubah menjadi panas, maka pesawat dengan ukuran tabung lebih besar dan dioperasikan pada tegangan tinggi biasanya memiliki radiator bersirip di bagian luar tabung untuk membantu proses pendinginan target. Untuk pesawat sinar-X dengan tegangan operasi sangat tinggi, proses pendinginan dilakukan dengan cara menempelkan target pada penopang tembaga (Cu). Keuntungan dari penggunaan target W dengan penopang Cu adalah karena keduanya dapat berperan sebagai pengalir panas yang sangat baik. Pada sistem ini, di belakang anoda ada ruang pendinginan yang memiliki lubang untuk mengalirkan fluida pendingin seperti minyak atau air guna mengambil panas dari target dan membuangnya keluar seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sistem pendinginan target pada pesawat sinar-X [16]

### 3.2. Pesawat Radiodiagnostik

Perkembangan aplikasi sinar-X dalam berbagai bidang kegiatan mendorong para profesional untuk menghadirkan berbagai jenis pesawat sinar-X dengan energi keluaran yang berbeda-beda disesuaikan dengan kebutuhan dan tujuan penggunaannya. Pesawat sinar-X dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok, seperti berdasarkan tujuan penggunaannya, cara penempatannya, atau bidang penerapannya [30]. Dari masing-masing kelompok itu pun nantinya masih dapat dibedakan lagi berdasarkan jenis penggunaannya yang lebih spesifik. Dalam kegiatan radiodiagnostik di bidang kesehatan misalnya, ada beberapa jenis pesawat sinar-X yang kegunaannya berbeda-beda, seperti pesawat khusus untuk kegiatan radiografi umum, radiografi anak, radiografi gigi, fluoroskopi, CT-Scan, mamografi, dan radiografi intervensional.

Berdasarkan tujuan penggunaannya di bidang kesehatan, pesawat sinar-X dapat dibedakan menjadi dua [29]. Pertama adalah pesawat sinar-X diagnostik yang digunakan untuk pencitraan organ bagian dalam tubuh seperti tulang, paru, jantung dan sebagainya. Pesawat jenis ini dapat mendeteksi keretakan yang sangat halus pada tulang maupun tumor pada berbagai jaringan tubuh manusia. Karena ditujukan untuk keperluan

diagnostik melalui pengambilan foto bagian dalam tubuh manusia, maka tegangan yang digunakan untuk operasi tabung tidak lebih dari 150 kV. Kedua adalah pesawat sinar-X terapi yang digunakan untuk radioterapi jaringan kanker atau tumor. Agar energi yang dibawa sinar-X memberikan daya rusak maksimal terhadap jaringan tumor, maka tegangan operasi tabung pesawat sinar-X terapi jauh lebih tinggi dibandingkan dengan yang dipakai untuk keperluan diagnostik, nilainya berkisar dari 400 kV hingga ribuan kV atau berorde Mega Volt (MV).

Begitu luas peran sinar-X dalam bidang kesehatan, sehingga di pusat-pusat pelayanan medis dapat ditemukan berbagai jenis pesawat sinar-X untuk berbagai tujuan penggunaan. Berdasarkan cara penempatannya, dikenal ada dua tipe pesawat sinar-X radiodiagnostik yang saat ini banyak dioperasikan untuk kegiatan pelayanan kesehatan, yaitu [31]:

- Pesawat sinar-X diagnostik terpasang tetap (*fixed* atau *stationary*) yang dilengkapi dengan *bucky stand*, yaitu pesawat sinar-X yang dipasang permanen dalam suatu ruangan dan tidak dapat dipindah-pindahkan, namun tidak termasuk pesawat sinar-X *mobile* yang ditempatkan dan digunakan pada ruangan yang tetap. Pesawat ini digunakan untuk pemeriksaan umum secara rutin, meliputi pemeriksaan toraks, abdomen, ekstremitas, lumbal dan femur. Pelayanan yang dapat dilakukan oleh pesawat jenis ini adalah pengguna harus mendatangi pesawat.
- Pesawat sinar-X *mobile* atau portabel, yaitu pesawat sinar-X yang dalam pengoperasian atau pemakaiannya dapat dipindah-pindahkan dari satu ruangan atau tempat ke ruangan atau tempat lainnya mengikuti lokasi penggunaannya, biasanya berukuran kecil agar mudah dibawa-bawa. Dalam hal ini pesawat akan mendatangi pengguna di lapangan. Masuk dalam katagori ini adalah pesawat sinar-X *mobile* yang ditempatkan dan digunakan pada ruangan tetap. Pesawat sinar-X *mobile* dilengkapi dengan baterai *charger* dan roda sehingga mudah bergerak. Pesawat ini dipakai untuk pemeriksaan umum secara rutin di instalasi gawat darurat, instalasi perawatan intensif, klinik, ruang praktik dokter, maupun ruang radiologi apabila pesawat sinar-X terpasang tetap mengalami kerusakan.

Berdasarkan penerapannya, pesawat sinar-X biasanya dibedakan dari sudut bidang kegiatan penggunaannya. Dalam hal ini ada dua kegiatan utama yang menggunakan pesawat sinar-X, yaitu bidang industri dan medik atau kesehatan. Pesawat sinar-X industri digunakan untuk keperluan uji tak merusak dalam kegiatan radiografi industri, difraktometri untuk analisis bahan dan kristalografi untuk penelitian bahan. Pesawat sinar-X medik digunakan dalam kegiatan medik yang meliputi kegiatan radiodiagnostik (pemeriksaan kesehatan) dan radioterapi (penyinaran kanker).

Selain klasifikasi di atas, dalam praktik di lapangan juga sering ditemukan istilah-istilah yang dikaitkan dengan pesawat sinar-X, seperti pesawat sinar-X konvensional. Pesawat ini merupakan salah satu jenis pesawat yang digunakan untuk keperluan radiografi medis. Arti konvensional di sini menunjukkan jenis pesawat dilihat dari mobilitasnya, di mana pesawat ini pergerakannya terbatas karena kondisinya menetap sehingga tidak dapat berpindah dari satu ruangan ke ruangan lain. Pesawat jenis ini umumnya digunakan untuk melayani pasien yang bisa diajak kerja sama, dengan kata lain pasien bisa atau mampu di periksa di kamar pemeriksaan. Kapasitas dari pesawat jenis ini cukup tinggi, dapat dioperasikan dalam berbagai variasi nilai mA. Faktor eksposi yang digunakan tinggi, sehingga memungkinkan pemeriksaan pada seluruh bagian tubuh. Dapat juga dilakukan pemeriksaan menggunakan media kontras dan fluoroskopi [32].

Selain untuk pembuatan foto organ tubuh, jenis pesawat sinar-X lainnya yang memiliki lingkup penggunaan sangat luas adalah pesawat yang dirancang untuk pembuatan foto gigi. Dengan bantuan pesawat sinar-X gigi, pemeriksaan kesehatan gigi dapat dilakukan dengan cara yang sangat praktis dan relatif mudah. Radiodiagnostik gigi merupakan hal yang penting dalam membantu dokter gigi mendiagnosis kelainan yang diderita pasien gigi. Untuk tujuan pembuatan foto gigi, dikenal adanya pesawat dental intraoral. Pesawat ini digunakan untuk pemeriksaan radiografi gigi dan struktur di sekitar intraoral. Pencitraan gigi bisa menggunakan film radiografi khusus gigi (konvensional), media penerima gambar selain film radiografi, serta komputer sebagai media perekam radiografi [33]. Ada

juga pesawat dental panoramik dan cephalometri yang digunakan untuk pemeriksaan radiografi kepala dan rahang.

Fluoroskopi sinar-X dibedakan menjadi dua kegiatan utama, yaitu fluoroskopi konvensional dan fluoroskopi intervensional [34]. Fluoroskopi konvensional adalah pesawat sinar-X yang dilengkapi dengan tabir penguat citra dan biasanya hanya digunakan untuk keperluan diagnostik. Sedangkan fluoroskopi intervensional bentuk *C-Arm* adalah pesawat sinar-X yang dilengkapi dengan tabir penguat citra, sering dimanfaatkan untuk mengetahui letak batu dalam tubuh manusia dan menghancurkan batu tersebut dengan pembangkit gelombang kejut. Fluoroskopi intervensional bentuk *C-Arm* juga digunakan sebagai penunjang bedah untuk membantu tindakan pembedahan pasien. Fluoroskopi intervensional lainnya berupa pesawat sinar-X yang memiliki tabir atau lembar penguat fluoresensi dan dilengkapi dengan sistem video sehingga dapat mencitrakan objek secara terus menerus. Fluoroskopi intervensional bentuk *U-Arm* yang ditempatkan di ruang bedah secara khusus digunakan untuk membantu tindakan pembedahan atau pemeriksaan pembuluh darah.

*Bone densitometry* adalah Pesawat sinar-X yang secara khusus dirancang dan dipergunakan untuk mengetahui densitas tulang [35]. Pesawat ini termasuk fluoroskopi konvensional karena memiliki mode fluoroskopi. Secara garis besar, komponen penyusun tubuh manusia dapat dibagi menjadi dua, yaitu jaringan lunak dan jaringan keras. Sifat jaringan keras seperti tulang adalah mempunyai kemampuan besar dalam menyerap radiasi foton yang melewatinya. Sedangkan kemampuan jaringan lunak dalam menyerap radiasi foton lebih rendah dibandingkan jaringan keras. Pengukuran intensitas radiasi yang melewati struktur tulang merupakan salah satu cara untuk menentukan kandungan mineral tulang yang erat kaitannya dengan kerapatan tulang.

Mamografi adalah tindakan pemeriksaan payudara dengan bantuan sinar-X. Tujuannya adalah untuk mendeteksi ada tidaknya proses keganasan di payudara, atau untuk menemukan proses lain selain keganasan sebelum timbulnya gejala [36]. Deteksi dini tumor payudara dengan teknik mamografi dapat dilakukan baik setelah adanya keluhan maupun tanpa disertai keluhan sama sekali. Keluhan yang umum dirasakan oleh kalangan wanita adalah adanya benjolan pada payudara, cairan yang

tidak normal keluar dari puting payudara, atau adanya nyeri pada payudara sebelum atau sesudah menstruasi.

*Computed Tomography Scanner* atau lebih populer dengan singkatan CT-Scan merupakan alat penunjang diagnosis dengan aplikasi universal yang ditujukan untuk pemeriksaan seluruh organ tubuh, seperti susunan saraf pusat, otot dan tulang, tenggorokan serta rongga perut [37]. Selain menggunakan sinar-X, pelaksanaan CT-Scan dapat juga dilakukan menggunakan radiasi nuklir jenis lainnya, seperti neutron dan sinar gamma. Pesawat CT-Scan mula-mula digunakan untuk kegiatan radiodiagnosis pada awal tahun 1970-an. Caranya adalah dengan melewatkan seberkas sinar-X terkolimasi pada tubuh pasien. Berkas radiasi dengan lebar sekitar 2 mm yang melewati tubuh itu selanjutnya ditangkap oleh sistem detektor yang posisinya berhadapan dengan sumber berkas di seberang bagian tubuh yang sedang disinari. Sumber berkas sinar-X bersama detektor bergerak di suatu bidang mengitari tubuh pasien. Berdasarkan perbedaan respons detektor pada berbagai posisi penyinaran kemudian dibuat suatu rekonstruksi ulang untuk mendapatkan gambar bidang tomografi dari bagian tubuh pasien yang disinari.

### **3.3. Alat Pemercepat Partikel**

Pesawat sinar-X generasi pertama pada umumnya hanya memproduksi sinar-X dengan energi berorde keV. Untuk mendapatkan sinar-X dengan energi yang sangat tinggi, biasanya digunakan alat pemercepat partikel atau akselerator [38]. Tabung sinar-X merupakan contoh paling sederhana tentang jenis akselerator partikel tunggal. Dalam tabung ini elektron yang dipancarkan oleh filamen panas dipercepat melalui tabung hampa menuju target wolfram (W) yang diberi beda potensial positif tinggi terhadap sumber elektron.

Seperti halnya tabung sinar-X, akselerator juga merupakan sistem peralatan yang dipakai untuk pemercepat gerak partikel nuklir bermuatan listrik seperti elektron, proton, inti-inti ringan serta inti atom lainnya. Pemercepat gerak partikel bertujuan agar partikel tersebut bergerak sangat cepat sehingga memiliki energi kinetik yang sangat tinggi. Alat ini pertama kali dikembangkan oleh dua orang fisikawan Inggris, John D.

Cockcroft (1897-1967) dan Ernest T.S. Walton (1903-1995), di Laboratorium Cavendish, Universitas Cambridge, pada 1929 [39].

Pada tahun 1928 Cockcroft mulai melakukan penelitian tentang akselerasi proton menggunakan tegangan tinggi. Di tempat yang sama di Laboratorium Cavendish, Walton juga mengupayakan partikel-partikel cepat dengan tegangan tinggi yang menjadi dasar kelahiran alat pemercepat partikel. Pada 1932, mereka sukses mentransmutasikan inti litium (Li) menjadi inti berilium (Be) dengan proton energi tinggi. Atas jasanya dalam merintis pengembangan akselerator ini, Cockcroft dan Walton dianugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada 1951.

Tidak lama setelah sukses pengoperasian dan eksperimen dengan akselerator Cockcroft-Walton, Robert J. Van de Graaff (1901-1967) mengembangkan generator elektrostatik di Universitas Princeton dan di Institut Teknologi Massachusetts. Selanjutnya menyusul pembangunan Siklotron di Lawrence dan Livingston. Siklotron dikembangkan pertama kali oleh Ernest O. Lawrence (1901-1958) pada tahun 1930. Alat ini terdiri atas dua ruang semisilinder yang saling berhadapan dan ditempatkan dalam medan magnet untuk menjaga agar partikel bermuatan bergerak dalam lintasan melingkar [23].

Semula, akselerator partikel dipakai sebagai sarana penelitian di laboratorium fisika nuklir energi tinggi. Namun ada beberapa jenis akselerator partikel yang dirancang dan dikembangkan dalam rangka memproduksi sinar-X energi tinggi untuk keperluan radioterapi di rumah sakit. Para ilmuwan merancang mesin akselerator sangat kuat yang berfungsi menyerupai tabung sinar-X berukuran sangat besar. Dari mesin ini dapat dipancarkan sinar-X berenergi sangat tinggi, karena sebagian besar akselerator mampu memercepat gerak elektron hingga energinya mencapai 20 MeV.

Salah satu jenis pesawat penghasil sinar-X energi tinggi adalah akselerator magnetik . yang diberi nama betatron [23]. Mesin ini terdiri atas tabung kaca hampa udara berbentuk cincin raksasa yang diletakkan di antara dua kutub magnet yang sangat kuat. Penyuntik berupa filamen panas yang berperan sebagai pemancar elektron dipasang untuk menginjeksikan aliran elektron ke dalam tabung dengan arah sudut tertentu. Setelah elektron diinjeksikan, ada dua gaya yang akan bekerja

pada elektron tersebut. Gaya pertama membuat elektron bergerak melingkar mengikuti lengkungan cincin tabung. Gaya kedua berperan mempercepat gerak elektron hingga kecepatannya semakin tinggi. Melalui gaya kedua ini elektron memperoleh energi kinetik yang sangat besar. Dalam waktu sangat singkat, elektron akan bergerak melingkar di dalam tabung beberapa ribu kali. Apabila energi kinetik elektron telah mencapai nilai tertentu, elektron dibelokkan dari jalur lengkungnya sehingga keluar lintasan dan menabrak secara langsung target yang berada di tepi ruangan. Dari proses tabrakan ini dipancarkan sinar-X berenergi sangat tinggi. Sebagian besar betatron mampu mempercepat elektron hingga berenergi kira-kira 20 MeV.

Betatron pertama kali diperkenalkan pada tahun 1941 oleh Donald William Kerst (1911-1993) dari Universitas Illinois, Amerika Serikat. Penamaan betatron mengacu pada salah satu jenis sinar radioaktif, yaitu sinar beta ( $\beta$ ), yang tak lain merupakan aliran elektron berenergi tinggi. Mesin betatron pertama mampu mempercepat elektron hingga memiliki energi kinetik maksimum  $2 \times 10^6$  eV, dan sinar-X yang dipancarkannya memiliki energi maksimum  $2 \times 10^6$  eV atau 2 MeV. Pengembangan lebih lanjut berhasil menghadirkan mesin betatron yang mampu mempercepat elektron hingga mencapai energi 300 MeV.

Betatron memiliki kelemahan karena mesin itu memerlukan magnet berukuran sangat besar guna mendapatkan perubahan fluks yang diperlukan untuk mempercepat elektron. Untuk mengatasi kelemahan ini, diperkenalkan jenis pemercepat elektron lainnya dengan menggunakan magnet berbentuk cincin yang diberi nama sinkrotron elektron [23]. Elektron dengan energi antara 50-100 keV dipancarkan dari filamen selanjutnya dipercepat di dalam alat. Pada saat akhir proses percepatan, elektron ditabrakkan ke target logam sehingga dihasilkan sinar-X dengan energi dan intensitas tinggi. Sinkrotron mampu mempercepat elektron hingga energi kinetiknya lebih besar dibandingkan betatron.

Dalam perkembangan berikutnya, para ilmuwan berhasil menghadirkan jenis mesin pemercepat partikel lain berupa akselerator linier (*linear accelerator*, LINAC). LINAC mempunyai kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan akselerator magnetik. Alat ini pertama kali diperkenalkan oleh Rolf Wideroe (1902-1996) di Swiss pada tahun

1929. Namun pada saat itu unjuk kerjanya kurang memuaskan. Kelebihan LINAC adalah alat ini memerlukan magnet dengan ukuran yang jauh lebih kecil dibandingkan pada akselerator magnetik untuk menghasilkan partikel dengan energi kinetik yang sama.

Pesawat LINAC dapat dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan hingga berenergi di atas 1 Giga elektron Volt (GeV,  $1\text{GeV} = 1.000.000.000\text{ eV}$ ). Partikel yang akan dipercepat diinjeksikan ke dalam ruangan vakum bermedan listrik atau magnet dengan tekanan  $10^{-15} - 10^{-26}$  mmHg. Setelah mencapai tingkat energi sesuai dengan yang diinginkan, berkas partikel langsung ditembakkan ke arah target sehingga terjadi reaksi nuklir antara partikel dan inti atom target.

Pesawat LINAC semula dirancang untuk mempercepat partikel bermuatan positif seperti proton [23]. Namun setelah melalui berbagai modifikasi, mesin ini dapat pula dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan negatif seperti elektron. Dalam hal ini elektron yang dipercepat mampu bergerak hingga mendekati kecepatan cahaya. Elektron dengan energi 2 MeV bergerak dengan kecepatan 0,98C, dengan C adalah cepat rambat cahaya dalam vakum, nilainya  $3 \times 10^8$  m/s. Jika elektron berenergi kinetik tinggi itu ditabrakkan ke arah target logam berat, maka dari pesawat LINAC ini akan dipancarkan sinar-X berenergi tinggi.

Hingga tahun 1998, terapi radiasi untuk pengobatan kanker yang banyak dipraktikkan di rumah sakit maupun klinik adalah terapi radiasi berbasis sinar-X, sinar gamma maupun berkas elektron. Peningkatan keberhasilan dalam teknik radioterapi kanker dilakukan melalui peningkatan terhadap sumber radiasi yang digunakan, seperti dirintisnya penggunaan akselerator untuk keperluan radioterapi [40]. Pesawat LINAC dapat berperan sebagai sumber radiasi partikel berupa berkas elektron cepat. Jika berkas elektron itu ditabrakkan pada target logam berat, maka akan dipancarkan sinar-X berenergi tinggi. Baik berkas elektron maupun sinar-X dapat dimanfaatkan secara langsung untuk radioterapi kanker. Pesawat radioterapi jenis ini pertama kali digunakan pada 1953 di Hammer Smith Hospital, London.

Kini teknologi LINAC dapat memproduksi sinar-X untuk keperluan radioterapi kanker dengan energi mencapai 15 MeV. Kelemahan utama dari LINAC adalah partikel harus bergerak lurus melalui sejumlah

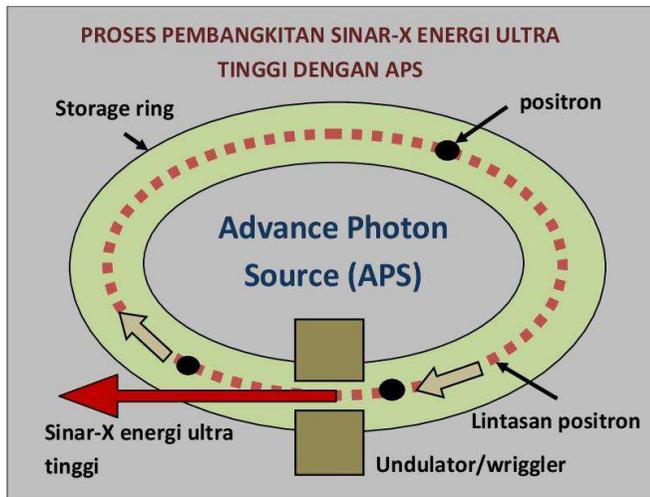
perangkat pemercepat yang kekuatannya harus semakin besar. Peningkatan kekuatan dari satu bagian perangkat ke bagian lainnya itu memerlukan lebih banyak komponen sehingga sangat rumit. Tabung LINAC harus dibuat sangat panjang dan dilengkapi dengan beberapa sumber tenaga di sekitarnya. Perkembangan dalam teknologi akselerator telah memberikan jalan diaplikasikannya sinar-X untuk radioterapi kanker dengan hasil yang cukup memuaskan. Dalam kegiatan medis, banyak kasus penyakit kanker berhasil disembuhkan melalui radioterapi dengan sinar-X yang dibangkitkan oleh akselerator [40].

### **3.4. Foton Energi Ultra Tinggi**

Pesawat LINAC modern dapat dipakai untuk mempercepat partikel hingga berenergi di atas 1 GeV (1 milyar eV atau 1.000 MeV). Peningkatan energi partikel masih terus diupayakan untuk memenuhi kebutuhan dalam berbagai jenis penelitian, baik untuk keperluan fisika nuklir maupun medis. Pada 1990, Amerika Serikat (AS) mulai membangun fasilitas pembangkit sinar-X berenergi ultra tinggi yang diberi nama *Advanced Photon Source* (APS). Sistem pembangkit yang memanfaatkan teknologi terbaru ini mampu menghasilkan berkas sinar-X dengan kekuatan berkasnya mencapai 10.000 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pesawat sinar-X yang ada di dunia saat itu, sehingga merupakan mesin pembangkit sinar-X dengan energi terbesar di dunia [41]. Fasilitas pembangkit sinar-X ini berupa bangunan berbentuk cincin raksasa yang dibangun di pusat riset Argonne National Laboratory, Illinois. Persetujuan pembangunan itu sendiri merupakan puncak keberhasilan dari masyarakat sains materi AS yang telah berjuang selama empat tahun sebelumnya.

Proses produksi sinar-X energi tinggi di dalam APS dilakukan dengan cara mempercepat gerak positron, yaitu partikel sejenis elektron tapi bermuatan positif, hingga memiliki energi kinetik lebih besar dari 7 milyar elektron Volt (7 GeV). Magnet khusus yang berperan sebagai pembelok dan pengumpul akan mengarahkan berkas positron yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya, sehingga berkas itu menjalani gerak melingkar di dalam cincin penyimpan (*storage ring*) yang diameternya mencapai tiga kali ukuran lapangan sepakbola.

Sepanjang lintasan melingkar cincin penyimpanan yang dilalui berkas positron tadi dipasang magnet sangat kuat yang diberi nama *wiggler* dan *undulator*, keduanya berfungsi membelokkan gerak berkas positron. Peristiwa pembelokan arah gerak berkas positron ini akan diikuti oleh terjadinya pancaran sinar-X yang sangat kuat pada arah tangensial dari jejak berkas positron seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 APS sebagai pembangkit sinar-X energi ultra tinggi [41]

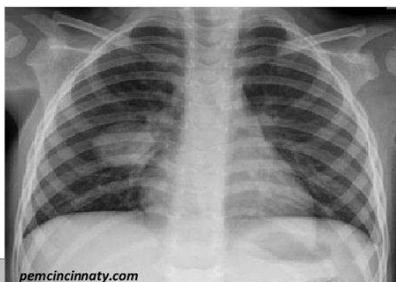
Selain AS, Jepang juga mengembangkan mesin raksasa pembangkit sinar-X energi ultra tinggi yang diberi nama Spring-8 (Super Photon Ring 8 GeV). Fasilitas berupa cincin raksasa yang mampu menghasilkan sinar-X berenergi hingga 8 Giga elektron-Volt ( $8 \times 10^9$  eV) itu dibangun oleh Lembaga Riset Energi Atom Jepang (JAERI) bekerja sama dengan Lembaga Riset Fisika dan Kimia Jepang (RIKEN) di Harima Science Garden City di Hyogo-ken, Kansai [42]. Seperti halnya APS di AS, Spring-8 juga dimanfaatkan untuk riset dasar dalam bidang fisika, kimia dan biologi serta riset terapan untuk pengembangan material baru dan aplikasi kedokteran. Spring-8 mulai dibuka dan beroperasi penuh pada musim gugur 1997.

Dalam fasilitas Spring-8, elektron dipercepat sehingga memiliki kecepatan yang sangat tinggi mendekati kecepatan cahaya. Jika arah gerak

elektron itu kemudian dibelokkan oleh medan magnet, maka radiasi sinkrotron akan terpancar dengan arah tangensial sepanjang jejak elektron. Jepang mengklaim bahwa Spring-8 merupakan fasilitas pembangkit radiasi sinkrotron terbesar di dunia. Radiasi sinkrotron yang diproduksi di dalam cincin raksasa Spring-8 selanjutnya dimanfaatkan untuk berbagai keperluan penelitian. Bidang-bidang penelitian yang bakal digarap melalui penelitian dengan fasilitas tersebut antara lain: penemuan material-material baru dengan fungsi dan kegunaannya baru, pengembangan dalam bidang diagnosis kedokteran dan pengobatan, mengungkap asal mula kehidupan, serta pengembangan teknologi mesin-mesin renik dan rangkaian terpadu (IC) dalam bidang elektronika.

Sinar-X energi ultra tinggi memiliki panjang gelombang yang sangat pendek, jauh lebih pendek dibandingkan ukuran atom. Oleh sebab itu, sinar-X tersebut dapat dipakai untuk mengamati dan memetakan berbagai jasad renik seukuran sel dengan hasil yang sangat akurat. Cepatnya proses pengambilan gambar dengan sinar-X berenergi ultra tinggi memungkinkan para peneliti mengamati serta mengikuti proses-proses yang sesungguhnya terjadi dalam reaksi biokimia seperti enzim dalam jaringan hidup [41].

# 4



## RADIOLOGI DIAGNOSTIK

Dalam kegiatan radiologi, jenis radiasi yang semula digunakan hanyalah sinar-X. Namun dengan perkembangan di bidang fisika dan instrumentasi nuklir, kini jenis radiasi yang digunakan bisa berupa gelombang, baik dari jenis pengion seperti sinar-X maupun non-pengion seperti gelombang mekanik dan medan magnet. Instrumen untuk pencitraan seperti ultrasonografi (USG) yang mengandalkan gelombang suara berfrekuensi ultra tinggi dan *magnetic resonance imaging* (MRI) yang mengandalkan medan magnet, merupakan instrumen pencitraan nonpengion yang sudah lazim digunakan.

Sejalan dengan perkembangan teknologi, saat ini pelayanan pencitraan diagnosis telah mencakup dua jenis kegiatan utama, yaitu pemeriksaan dengan sinar-X konvensional yang lebih dikenal dengan sebutan radiologi diagnostik dan pemeriksaan intervensional yang lebih dikenal dengan sebutan radiologi intervensional. Dalam radiologi diagnostik, sinar-X dimanfaatkan untuk prosedur diagnosis seperti pemeriksaan dada (toraks), tulang, ginjal dan saluran kemih, saluran cerna dan sebagainya. Dalam radiologi intervensional sinar-X digunakan untuk mendeteksi kelainan organ melalui penilaian pembuluh darah yang dimasuki bahan kontras seperti pelaksanaan biopsi, pengeluaran cairan, pemasukan kateter, atau pelebaran terhadap saluran atau pembuluh darah yang menyempit.

Dalam bidang kedokteran, teknik nuklir dimanfaatkan untuk tindakan-tindakan radiodiagnostik, radioterapi dan kedokteran nuklir [43]. Tindakan radiodiagnostik bertujuan untuk mendeteksi adanya kelainan atau kerusakan pada organ dan kanker pada tubuh dengan menggunakan radiasi pengion yang diproduksi oleh pesawat sinar-X energi rendah. Dari tindakan ini akan diperoleh hasil dalam bentuk citra anatomi suatu organ.

Antara 70 hingga 80 persen dari semua permasalahan kesehatan tubuh manusia ternyata dapat dijawab dengan menggunakan dua pilar utama pencitraan diagnostik, yaitu radiodiagnostik atau radiografi menggunakan sinar-X dan USG. Pencitraan tersebut bertujuan membuat gambar konfigurasi bagian dalam dari sebuah objek padat, seperti bagian tubuh manusia, dengan menggunakan energi yang dibawa gelombang. Pencitraan diagnostik telah menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari dunia kesehatan.

Pencitraan radiodiagnostik modern menawarkan berbagai macam teknik dan modalitas sehingga memungkinkan para dokter untuk mempelajari fungsi maupun morfologi tubuh manusia secara terperinci dan dapat dipertanggungjawabkan hasilnya secara ilmiah [44]. Pemeriksaan dengan teknik ini dapat memberikan informasi klinis dan sangat membantu dalam menegakkan diagnostik penyakit yang diderita pasien. Hasil pemeriksaannya sangat berpengaruh dalam penatalaksanaan maupun terapi pasien. Pelayanan pemeriksaan itu dapat diberikan baik kepada pasien dewasa maupun anak-anak. Radiasi yang digunakan tidak berbahaya bagi pasien pada interval waktu tertentu karena dosis yang diterima pasien maupun energi radiasi yang digunakan relatif rendah.

#### **4.1. Radiografi Umum**

Dalam kondisi normal dan sehat, setiap orang tetap perlu secara rutin melakukan pemeriksaan kesehatan untuk mendeteksi sejak dini adanya ketidaknormalan. Langkah ini merupakan satu-satunya cara termudah dan termurah untuk mencegah serangan penyakit pada tubuh. Untuk mendeteksi gangguan kesehatan, perlu suatu pemeriksaan menyeluruh yang meliputi paru, ginjal, hati, dan jantung, serta sistem metabolisme tubuh, yaitu gula darah, kolesterol, dan asam urat. Beberapa tes kesehatan perlu dilakukan setelah memasuki usia tertentu atau setelah muncul keluhan.

Pemeriksaan toraks merupakan salah satu jenis pemeriksaan kesehatan yang paling sering dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat kesehatan seseorang [43]. Pemeriksaan ini berfungsi untuk menilai kesehatan paru dan organ lain yang berada di sekitarnya. Pemeriksaan toraks juga menjadi salah satu komponen utama dalam pelaksanaan pemeriksaan kesehatan menyeluruh (*medical check-up*) bagi seseorang. Gambaran mengenai kondisi toraks dan organ lain di sekitarnya dapat diperoleh melalui pencitraan radiografi.

Radiografi adalah kegiatan penggunaan radiasi pengionan, terutama sinar-X, untuk membentuk bayangan benda yang dikaji pada film fotografi. Radiografi pada umumnya digunakan untuk melihat benda tak tembus pandang, misalnya bagian dalam organ tubuh manusia seperti paru, jantung, ginjal, usus, keretakan tulang dan sebagainya. Gambaran benda yang diambil dengan teknik radiografi disebut radiograf. Gambar itu selanjutnya digunakan untuk evaluasi struktur jaringan baik yang keras seperti tulang maupun yang lunak selain tulang [45].

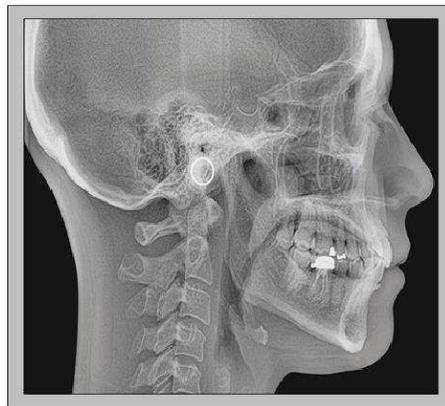
Foto toraks yang dibuat dengan sinar-X atau sering disebut *chest X-ray* (CXR) adalah suatu proyeksi dari toraks untuk mendiagnosis kondisi-kondisi yang memengaruhi toraks, isi dan struktur-struktur di sekitarnya. CXR dapat digunakan untuk mendiagnosis banyak kondisi yang melibatkan dinding toraks, tulang toraks dan struktur yang berada di dalam kavitas toraks termasuk paru, jantung dan saluran-saluran besar. Gangguan kesehatan berupa pneumonia dan gagal jantung kongesti sering kali dapat terdiagnosis melalui pengamatan foto toraks.

Foto toraks sering digunakan untuk *screening* penyakit paru terkait dengan jenis pekerjaan seperti kegiatan pertambangan di mana para pekerjanya mudah terpapar oleh debu dan gas radon. Secara umum kegunaan dari CXR adalah untuk mendeteksi abnormalitas kongenital (jantung dan vaskuler), untuk melihat adanya trauma (*pneumothorax* dan *haemothorax*), untuk melihat adanya infeksi (umumnya *tuberculosis*), untuk memeriksa keadaan jantung, dan untuk memeriksa keadaan paru. Apabila muncul dugaan kelainan berdasarkan hasil pengamatan CXR, pemeriksaan pencitraan toraks tambahan perlu dilakukan untuk mendiagnosis kondisi secara pasti atau untuk mendapatkan bukti-bukti yang memperkuat hasil diagnosis yang diperoleh dari CXR. Pemeriksaan toraks dengan sinar-X dapat mengungkap penyakit seperti *tuberculosis* dan

penyakit paru lainnya pada tahap awal sehingga dapat diberikan pengobatan atau penanganan medis lain dengan segera.

Sejak penemuan sinar X oleh Wilhelm C. Roentgen pada 1895 dan diproduksinya peralatan radiografi pertama untuk penggunaan diagnostik klinis, prinsip dasar dari radiodiagnosis tidak mengalami perubahan sama sekali, yaitu memproduksi suatu gambar pada film fotografi dengan berkas sinar-X yang mengalami absorpsi dan atenuasi ketika melalui berbagai organ atau bagian tubuh yang berbeda-beda kerapatannya [46]. Gambar terbentuk karena adanya perbedaan intensitas sinar-X yang mengenai permukaan film setelah terjadinya penyerapan sebagian sinar-X oleh bagian-bagian tubuh manusia.

Daya serap tubuh terhadap sinar-X sangat bergantung pada kandungan unsur-unsur yang ada di dalam organ. Tulang manusia yang didominasi oleh unsur *calcium* (Ca) mempunyai kemampuan menyerap yang tinggi terhadap sinar-X. Karena penyerapan itu maka sinar-X yang melewati tulang akan memberikan bayangan gambar pada film yang berbeda dibandingkan bayangan gambar dari organ tubuh yang hanya berisi udara seperti paru, atau air seperti jaringan lunak pada umumnya. Jika sebuah film fotografi ditempatkan pada bayangan seorang pasien, film tersebut akan menghasilkan citra dari bagian dalam tubuh pasien, misal tulang akan tampak terang sementara jaringan lunak tampak lebih gelap pada gambar hasil pencitraan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pembuatan gambar anatomi bagian dalam tubuh manusia dengan sinar-X [47]

*Tulang merupakan salah satu komponen penyusun tubuh yang memiliki arti penting dalam mendukung aktivitas kehidupan sehari-hari. Kerusakan pada bagian tulang sangat berpengaruh terhadap kenyamanan tubuh manusia. Salah satu jenis kecacatan atau kerusakan pada tulang yang sering dijumpai adalah fraktur, yaitu suatu keadaan di mana tulang mengalami retak atau patah. Karena letak tulang yang berada di dalam tubuh, maka perlu dilakukan pemotretan dengan sinar-X untuk mengamatinya. Gambar radiograf hasil pemotretan tersebut selanjutnya digunakan petugas medis untuk mengevaluasi kondisi tulang. Pemeriksaan dilakukan dengan cara mengamati gambar radiograf secara langsung dengan menggunakan kemampuan visual petugas medis. Radiografi sinar-X menjadi andalan utama untuk mendeteksi cedera pada tulang. Keretakan yang sangat halus sekalipun pada organ ini dapat diamati melalui gambar hasil pencitraan radiografi sinar-X.*

Jika pemeriksaan radiografi dilakukan terhadap organ-organ tertentu dalam tubuh yang karena daya serapnya terhadap radiasi menyebabkan organ tersebut sulit di bedakan dengan organ lain di sekitarnya, misal radiografi pada organ usus atau ginjal, maka pasien tersebut harus diberi medium kontras. Maksud utama dari penggunaan medium ini adalah untuk meningkatkan kualitas gambar citra dalam radiodiagnostik. Pemberian medium kontras dimaksudkan untuk mendapatkan hasil pemeriksaan yang baik dan informatif. Medium kontras yang diberikan dapat berupa larutan yang diminum atau dimasukan melalui anus atau berupa suntikan bergantung pada jenis organ yang akan diperiksa. Medium kontras ini berfungsi sebagai pewarna yang akan menuju ke organ target dan memberikan citra organ yang jelas pada gambar yang diperoleh dari hasil pemotretan dengan sinar-X seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pemanfaatan medium kontras untuk mempertajam gambar hasil pencitraan [48]

Bahan yang memiliki nomor atom cukup tinggi seperti barium (Ba) dalam senyawa  $BaSO_4$  sering dimanfaatkan sebagai medium kontras. Bahan ini tidak berbahaya dan diberikan dengan cara diminumkan untuk mengisi bagian atas saluran pencernaan atau disuntikkan untuk menandai bagian bawah. Dengan mendeteksi alur barium di dalam tubuh, maka jenis-jenis tumor maupun gangguan lainnya dapat dideteksi sebagai kelainan saluran. Bahan lain yang juga sering digunakan sebagai media kontras adalah iodine (I) yang banyak dipakai untuk mempelajari sistem aliran darah dalam tubuh. Metode diagnosis nya dilakukan dengan cara mengikatkan I ke beberapa molekul tertentu yang dibutuhkan oleh organ-organ tertentu dalam tubuh. Dengan mendeteksi alur I dapat dihasilkan bayangan gambar dari ginjal, kandung kemih maupun empedu [48].

Ada beberapa jenis pemeriksaan radiografi sinar-X yang perlu bantuan medium kontras, umumnya dilakukan pada bagian-bagian yang tersusun oleh jaringan lunak seperti beberapa contoh pemeriksaan sebagai berikut [49]:

- *Oesophagus*: pemeriksaan secara radiologi organ traktus digestivus pada daerah esofagus dengan menggunakan bahan kontras barium

sulfat yang dilarutkan dalam air dengan komposisi 1:1 dan dimasukkan melalui oral.

- *Maag Duedonum*: pemeriksaan secara radiologi pada organ lambung dengan menggunakan bahan kontras barium sulfat yang dilarutkan dalam air dan dimasukkan melalui oral.
- *Follow Through*: pemeriksaan secara radiologi pada organ usus halus dengan menggunakan bahan kontras barium sulfat yang dilarutkan dalam air dan dimasukkan melalui oral.
- *Intra Vena Pyelography (IVP)*: pemeriksaan secara radiologi pada organ traktus urinarius (ginjal, urether, buli-buli) dengan menggunakan bahan kontras melalui penyuntikan intravena.
- *Appendikogram*: pemeriksaan secara radiologi pada daerah apendiks dengan menggunakan bahan kontras barium sulfat yang di larutkan dalam air dan di minum.
- *Retrograde Pyelography (RPG)*: pemeriksaan secara radiologi pada organ traktus urinarius dengan menggunakan bahan kontras yang dimasukan melalui kateter ke dalam ginjal dan salurannya.
- *Bipoler Uretrogram*: pemeriksaan secara radiologi pada organ traktus urinarius dengan menggunakan bahan kontras yang dimasukan melalui kateter sistomi ke dalam buli-buli dan secara *retrograde* melalui ureter.
- *Myelography*: pemeriksaan secara radiologi pada organ *canalis medulla spinalis* dengan menggunakan bahan kontras yang dimasukan melalui lumbal fungsi.
- *Hystero Salvingography (HSG)*: pemeriksaan secara radiologi pada organ genitalia wanita dengan menggunakan bahan kontras yang dimasukan melalui uterus dan tuba uterine.
- *Fiestelography*: pemeriksaan secara radiologi untuk fistel (kedalaman, hubungan dengan organ lain) dengan menggunakan bahan kontras dimasukan melalui fistel tersebut.

Pencitraan radiodiagnostik biasanya dilakukan oleh ahli radiografi atau penata rontgen. Seorang radiolog (dokter spesialis radiologi) kemudian membaca atau menginterpretasikan gambar untuk mendeteksi cedera, menentukan seberapa serius cedera tersebut atau membantu

mendeteksi kelainan seperti tumor. Seorang spesialis radiologi juga harus menginterpretasikan hasil dan berkonsultasi dengan dokter utama untuk menegakkan diagnosis yang akurat.

Pemeriksaan diagnostik radiologi telah menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari dunia kesehatan. Teknik pencitraannya juga terus mengalami peningkatan. Hingga saat ini, pelayanan radiodiagnostik telah diselenggarakan oleh berbagai sarana pelayanan kesehatan pada berbagai tingkat pelayanan baik pemerintah maupun swasta, dengan kemampuan dan mutu pelayanannya terus ditingkatkan agar dapat memenuhi tuntutan kepuasan pengguna jasa, yaitu pelanggan yang dapat terdiri dari pasien, keluarga, masyarakat dan pihak berkepentingan lainnya.

Perkembangan dalam bidang teknologi, terutama setelah ditemukannya beberapa jenis pemantau radiasi dan metode proses pembentukan bayangan gambar dengan komputer, memungkinkan proses pembentukan bayangan gambar pada film diubah dengan cara merekonstruksi bayangan gambar dengan komputer. Dengan teknik ini, bayangan gambar dapat diperoleh dengan segera. Kemampuan untuk membedakan antara jaringan yang satu dengan lainnya juga mengalami peningkatan.

#### **4.2. Radiografi Anak,**

Dalam hal kesehatan, anak-anak seringkali memiliki kebutuhan yang berbeda dengan orang dewasa. Fisik anak-anak yang biasanya lebih rentan terhadap penyakit dibandingkan dengan orang dewasa, dapat menjadi masalah ketika mereka terkena penyakit. Untuk itulah, pemeriksaan kesehatan anak juga perlu dibedakan dengan orang dewasa, yakni masuk dalam ranah *pediatrik* [50]. *Pediatrik* adalah cabang ilmu kedokteran yang berhubungan dengan perawatan medis bayi (*infant*), anak-anak (*children*), dan remaja (*adolescent*).

Menurut *American Academy of Pediatrics* (AAP), *pediatrik* adalah spesialisasi ilmu kedokteran yang berkaitan dengan fisik, mental dan sosial kesehatan anak sejak lahir sampai dewasa muda. *Pediatrik* juga merupakan disiplin ilmu yang berhubungan dengan pengaruh biologis, sosial, lingkungan dan dampak penyakit pada perkembangan anak. Dokter *pediatrik* biasanya menangani konsultasi kesehatan anak mulai dari yang

baru lahir hingga berusia 18 tahun, atau bahkan 21 tahun untuk beberapa negara. Kedokteran Pediatrik sendiri dibagi menjadi beberapa sub-spesialisasi, antara lain: pengobatan remaja, pediatrik penganiayaan anak, pediatrik perkembangan dan *behavioural*, *neonatology* atau perawatan anak baru lahir, pediatrik alergi dan imunologi, pediatrik kardiologi dan sebagainya.

Masyarakat internasional mengelompokkan populasi pediatrik menjadi beberapa kelompok sebagai berikut: *preterm newborn infants* (bayi prematur yang baru lahir), *term newborn infants* (bayi baru lahir dengan usia antara 0-28 hari), *infants and toddlers* (bayi dan anak kecil yang baru belajar berjalan dengan usia di atas 28 hari hingga 23 bulan), *children* (anak-anak berusia antara 2 hingga 11 tahun), *adolescents* (anak remaja berusia antara 12 hingga 16 atau 18 tahun bergantung pada daerah masing-masing).

Penilaian tumbuh kembang anak secara medis diperlukan untuk mengetahui apakah seorang anak tumbuh dan berkembang secara normal atau tidak. Anak yang sehat akan menunjukkan tumbuh kembang yang optimal apabila didukung oleh bio-fisiko-psikososial yang memadai. Penilaian pertumbuhan anak dimulai dengan mengevaluasi hasil pengukuran tinggi dan berat badan yang tergambar dalam kurva standar pertumbuhan anak sejak dalam kandungan hingga remaja. Sedang penilaian perkembangan anak pada fase awal umumnya dibagi menjadi empat aspek kemampuan fungsional, yaitu motorik kasar, motorik halus dan penglihatan, kemampuan berbicara, bahasa dan pendengaran serta sosial emosi dan perilaku. Adapun parameter ukuran antropometrik yang dipakai pada penilaian pertumbuhan fisik anak antara lain adalah: tinggi badan, berat badan, lingkaran kepala, lingkaran dada, lipatan kulit, lingkaran lengan atas, panjang lengan, proporsi tubuh, dan panjang tungkai [51].

Kondisi tubuh pada usia anak-anak berbeda dari orang dewasa secara anatomis, fisiologis, imunologis, psikologis, perkembangan dan metabolismenya. Secara *fisiologis*, anak balita atau anak baru lahir sangat berbeda dengan orang dewasa karena beberapa organ penting belum matang seperti halnya orang dewasa. Cacat bawaan, variasi genetik, dan perkembangan fisik menjadi masalah yang umum terjadi untuk pediatrik

dibandingkan dengan pasien dewasa. Bahkan, penanganan penyakit pada anak yang telah cukup dewasa dengan usia kurang dari 18 tahun juga tetap berbeda dengan penanganan untuk pasien orang dewasa pada umumnya.

Tidak jarang untuk menangani masalah kesehatan anak diperlukan pula pemeriksaan radiologi. **Secara** umum, pemeriksaan radiologi bisa dilakukan pada bayi meskipun mereka memiliki tingkat kepekaan yang lebih tinggi terhadap paparan sinar-X dibandingkan dengan usia dewasa. Yang penting harus ada indikasi yang menyatakan perlunya pemeriksaan tersebut dilakukan. Pada bayi, pemeriksaan radiografi sinar-X biasanya dilakukan untuk *cek kesehatan secara umum* maupun untuk mendiagnosis penyakit. Berikut ini adalah beberapa keadaan yang membolehkan dilakukannya pemeriksaan kesehatan bayi dengan radiografi sinar-X, seperti [52]:

- Jika dicurigai adanya trauma pada saat proses persalinan, bisa diperiksa apakah ada tulang yang patah, misalnya fraktur klavikula (patah tulang bahu). Peristiwa ini bisa terjadi pada janin yang mengalami kelainan letak, seperti sungsang atau letak lintang.
- Untuk melihat apakah pertumbuhan bayi sesuai dengan usia, pemeriksaan *bone age* dapat dilakukan jika ada kecurigaan mengenai adanya ketidakseimbangan. Misal bayi yang telah berusia satu tahun tetapi pertumbuhannya seperti usia enam bulan. Biasanya tes ini dilakukan pada anak-anak di atas usia bayi.
- Pada bayi yang dicurigai menderita DBD (demam berdarah dengue) ada pemeriksaan foto khusus, yaitu RLD (*right lateral decubitus*) untuk melihat apakah ada cairan pada kantung paru (efusi pleura). Jika ditemukan menandakan derajat keparahan penyakitnya sudah tinggi.
- Pada saat lahir kepala bayi terlihat besar di luar batas kewajaran dan dicurigai menderita hidrosefalus. Perlu pemeriksaan untuk memastikan keadaan ventrikel pada otak, apakah terisi cairan atau tidak seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.
- Jika bayi belum buang air besar sejak lahir, ada kemungkinan bayi mengalami atresia ani atau anus imperforatus (pembentukan lubang anus yang tidak sempurna). Karena itu perlu dilakukan pemeriksaan untuk memastikan dan mengetahui posisi terjadinya sumbatan,

sehingga dokter dapat menentukan jenis terapi apa yang perlu dilakukan.

- Bayi yang lahir dengan usia kandungan kurang bulan biasanya sering mengalami distres pernapasan (sesak) karena kekurangan surfaktan, penyakitnya disebut HMD (*hyaline membrane disease*).



Gambar 4.3 Radiografi sinar-X untuk memastikan kasus *hydrocephalus* pada bayi yang baru lahir [53]

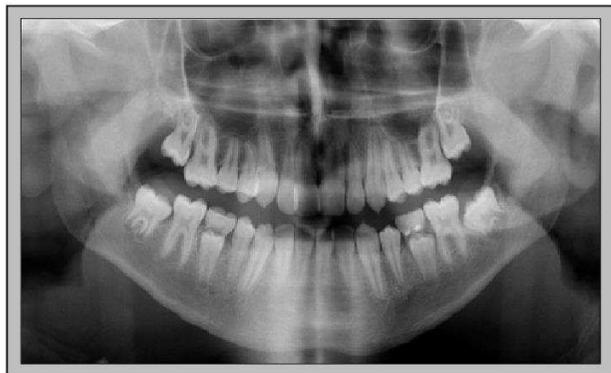
### 4.3. Radiografi Gigi

Gigi merupakan organ tubuh yang sangat penting namun sering terlupakan dalam program perawatan kesehatan. Gangguan pada gigi bisa menimbulkan gangguan pada organ tubuh lain. Deteksi dini kelainan gigi sangat penting bagi kesehatan, namun banyak orang yang malas memeriksakan gigi sampai kondisinya parah sehingga sulit diobati. Pada umumnya, seseorang baru akan ke dokter gigi jika mulai muncul dan merasakan keluhan. Gigi berlubang atau infeksi pada sisa akar gigi yang dicabut bisa menjadi pintu masuk penyakit yang lebih serius, seperti ginjal, jantung, sendi, dan infeksi paru. Penyakit gigi yang tersembunyi juga bisa menyebabkan sakit kepala, telinga, sendi bahu, maupun rahang [54].

Berdasarkan data yang dirilis oleh Departemen Kesehatan Republik Indonesia pada 2008, penyakit gigi dan mulut termasuk dalam 10 besar penyakit yang banyak dikeluhkan oleh masyarakat Indonesia. Temuan

tersebut diperkuat dengan hasil Riset Dasar Kesehatan yang menyatakan bahwa sekitar 26 persen penduduk Indonesia mengalami permasalahan gigi dan mulut, namun baru sekitar 31 persen dari mereka yang telah mendapatkan pelayanan kesehatan gigi dan mulut. Terdapat sekitar 23 Provinsi di Indonesia yang masih kekurangan jumlah dokter gigi. Sedang data yang dirilis oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia pada 2013 menunjukkan bahwa dari semua puskesmas di Indonesia yang jumlahnya mencapai 7.158 unit, baru sekitar 60 persen yang memiliki dokter gigi [55].

Radiografi gigi adalah suatu gambaran radiografi pada suatu film khusus yang dihasilkan dengan paparan radiasi sinar-X ke arah gigi dan struktur jaringan pendukung gigi. Hasil radiografi gigi berupa citra gigi dan daerah sekitarnya seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Citra gigi dapat dijadikan sebagai alat bantu dalam mendiagnosis dan rencana pengobatan penyakit mulut seperti karies, periodontal penyakit dan patologi oral [56]. Penggunaan gambar hasil citra dari radiografi gigi bervariasi antara lain untuk mendeteksi penyakit, lesi, dan kondisi gigi serta tulang yang tidak bisa dilihat secara klinis. Kegiatan ini merupakan langkah awal deteksi sebelum munculnya keparahan penyakit gigi. Dalam tindakan perawatan gigi sangat baik jika dilakukan radiologi gigi sebagai penunjang untuk pemeriksaan klinis sehingga tahapan atau langkah dalam pengobatan bisa dilakukan dengan cara yang terbaik.



Gambar 4.4 Hasil citra gigi dipakai sebagai alat bantu rencana pengobatan penyakit mulut [57]

Radiografi gigi sangat penting bagi dokter gigi untuk diagnosis penyakit, perencanaan pengobatan sakit gigi, serta menjadi sarana evaluasi terhadap perawatan yang telah dilakukan sebelumnya. Radiografi gigi tidak hanya dipakai untuk mendeteksi penyakit tetapi juga untuk memastikan penyakit yang diderita serta membantu untuk mengetahui letak dari lesi ataupun benda asing. Radiografi gigi menggambarkan informasi yang dibutuhkan selama perawatan gigi, seperti pada prosedur perawatan saluran akar. Pemeriksaan radiografi gigi umumnya dilakukan setelah pemeriksaan klinis lengkap terhadap gigi. Radiografi gigi juga dapat digunakan untuk memeriksa status kesehatan gigi dan tulang selama pertumbuhan dan perkembangannya [56].

Pada pemeriksaan radiografi, dokter gigi harus mempertimbangkan dan memutuskan teknik radiografi mana yang cocok digunakan terhadap kasus penyakit gigi yang sedang ditanganinya. Ada dua jenis pemeriksaan radiografi gigi, yaitu pemeriksaan intra oral dan pemeriksaan ekstra oral. Pemeriksaan intra oral menggambarkan sebagian kecil dari keadaan gigi dan struktur pendukung radiografi intra oral. Dalam kegiatan ini film radiografi diletakkan di dalam mulut pasien. Sedang pemeriksaan ekstra oral menggambarkan seluruh daerah tengkorak dan rahang. Film radiografi diletakkan di luar mulut pasien.

Radiografi intra oral terdiri dari tiga jenis pelayanan, yaitu pemeriksaan periapikal, interproksimal dan oklusal. Pemeriksaan periapikal dilakukan dengan dua teknik, yaitu teknik kesejajaran dan teknik bidang bagi. Teknik-teknik ini digunakan untuk memeriksa kondisi mahkota dan akar gigi serta struktur periodontal gigi. Pemeriksaan interproksimal dilakukan menggunakan teknik *bite-wing* yang berguna untuk memeriksa mahkota gigi pada dua rahang sekaligus, yaitu rahang atas dan rahang bawah yang tergambar pada satu film saja. Pemeriksaan oklusal dilakukan dengan teknik oklusal yang berguna untuk pemeriksaan mandibula atau maksila dengan area yang lebih luas yang tergambar pada satu film.

Di bidang kedokteran gigi, pemeriksaan radiografi mempunyai peran yang sangat penting. Hampir semua perawatan gigi dan mulut membutuhkan data dukung pemeriksaan radiografi agar perawatan yang dilakukan mencapai hasil yang optimal. Gambaran radiografi sangat

membantu dokter gigi dalam menegakkan diagnosis dan rencana perawatan yang akan dilakukan. Radiografi gigi merupakan salah satu bagian terpenting dari diagnosis oral modern. Guna mendapatkan hasil diagnosis yang tepat dan akurat, setiap dokter gigi harus mengetahui nilai dan interpretasi suatu hasil pencitraan radiografi. Hasil citra radiografi gigi dengan sinar-X dapat menunjukkan lesi patologis yang tidak dapat diidentifikasi dengan cara lain. Di samping itu, hasil citra radiografi yang diperoleh juga harus dapat menunjukkan lokasi lesi tersebut [54].

Dalam program perawatan kesehatan gigi dan mulut, radiografi sering digunakan pada klinis dan penelitian untuk mengevaluasi penyakit periodontal. Teknik ini dapat mengevaluasi derajat keparahan dan pola kehilangan tulang alveolar, panjang akar gigi, anatomi dan posisi serta mendeteksi lesi patologis periodontal. Pada pasien yang mengalami penyakit periodontal, teknik radiografi yang sering dilakukan adalah foto intra oral *bite-wing* dan periapikal. Hal ini sering dipilih karena hasil dari foto tersebut lebih akurat dibandingkan dengan teknik radiografi ekstra oral panoramik. Teknik radiografi konvensional dan digital dapat digunakan untuk mendeteksi kehilangan tulang alveolar yang berhubungan dengan penyakit periodontal. Kehilangan tulang alveolar dapat disebabkan oleh adanya proses inflamasi, trauma dan penyakit sistemis. Di samping itu, proses kehilangan tulang alveolar memiliki pola yang dapat dilihat melalui hasil pencitraan gigi dengan radiografi sinar-X [56].

Teknik pengambilan radiografi secara digital kini telah berkembang dan menjadi populer di kalangan dokter gigi. Teknologi terbaru ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sistem pengambilan radiografi konvensional. Pada sistem digital tidak menggunakan film dan proses kimia untuk pengembangan film fotografi sehingga gambar hasil pencitraan bisa diperoleh dengan cara lebih cepat. Gambar radiograf yang dihasilkan oleh sistem digital dapat langsung dievaluasi melalui layar komputer yang terhubung langsung dengan sistem digital. Hasil foto dapat dilihat langsung pada layar komputer dan dapat diperbesar untuk memperjelas gambaran foto pada daerah-daerah tertentu.

Radiografi gigi sangat membantu dalam proses pengamatan perubahan sekunder dari suatu trauma, karies, maupun penyakit periodontal. Penggunaan radiografi gigi secara tepat sangat membantu

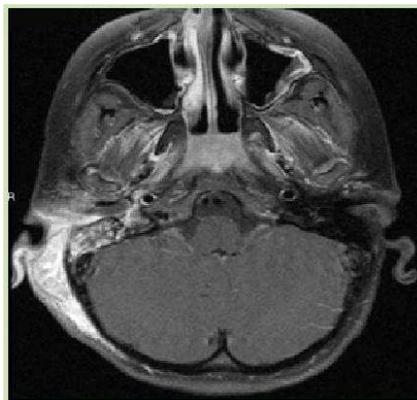
dokter gigi dalam mendeteksi penyakit sehingga menguntungkan bagi pasien karena dapat meminimalisir serta mencegah penyakit, seperti munculnya rasa sakit yang disebabkan oleh gigi. Radiografi gigi juga diperlukan oleh dokter gigi sebagai kebutuhan untuk melakukan operasi gigi. Diagnosis melalui hasil pencitraan gigi dengan teknik radiografi sangat menguntungkan bagi pasien dalam menghemat waktu dan biaya dikala pasien sedang mendapatkan perawatan kesehatan gigi.

#### **4.4. Pemindai Tomografi Terkomputasi**

*Computed Tomography Scanner* atau lebih populer dengan singkatannya CT-Scan (pemindai CT) merupakan alat penunjang diagnosis dengan aplikasi universal yang ditujukan untuk pemeriksaan seluruh organ tubuh, seperti susunan saraf pusat, otot dan tulang, tenggorokan serta rongga perut [58]. Selain menggunakan sinar-X, pelaksanaan pemindaian dengan pesawat CT dapat juga dilakukan menggunakan radiasi nuklir jenis lainnya, seperti neutron dan sinar gamma. Pesawat pemindai CT mula-mula digunakan untuk kegiatan radiodiagnosis pada awal tahun 1970-an. Pada mulanya dikenal sebagai *computed axial tomography* (CAT), suatu metode penggambaran medis secara tomografi di mana pemroses geometri digunakan untuk menghasilkan sebuah gambar tiga dimensi bagian dalam sebuah objek dari satu seri besar gambar sinar-X dua dimensi yang diambil dalam satu sumbu putar.

Pencitraan organ dengan pemindai CT dilakukan dengan cara melewatkan seberkas sinar-X terkolimasi pada tubuh pasien. Berkas radiasi dengan lebar sekitar 2 mm yang melewati tubuh itu selanjutnya ditangkap oleh sistem detektor yang posisinya berhadapan dengan sumber berkas di seberang bagian tubuh yang sedang disinari. Sumber berkas sinar-X bersama detektor bergerak di suatu bidang mengitari tubuh pasien. Berdasarkan perbedaan respons detektor pada berbagai posisi penyinaran kemudian dibuat suatu rekonstruksi ulang dengan komputer untuk mendapatkan gambar bidang tomografi dari bagian tubuh pasien yang disinari. Istilah tomografi berasal dari bahasa Yunani *tomos* (potongan) dan *graphia* (penggambaran). Pemindai CT menghasilkan satu seri gambar aksial yang dapat dimanipulasi melalui sebuah proses komputasi untuk menghasilkan gambar dalam bidang yang berbeda.

Pencitraan dengan pemindai CT dapat memberikan gambaran tentang sifat morfologik berdasarkan perubahan atau perbedaan transmisi radiasi melalui organ atau bagian tubuh yang diperiksa. Dengan pemindai CT, sinar-X mampu membedakan antara dua jaringan yang sangat mirip dalam otak manusia, yaitu antara *grey matter* dengan *white matter*. Pencitraan dengan pemindai CT biasanya dilakukan pada bidang aksial, namun rekonstruksi komputer dapat diberikan di pesawat lain atau untuk menghasilkan gambar tiga dimensi (3D) organ internal tubuh seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Pemindai CT untuk citra tomografi otak manusia [59]

Cara kerja pemindai CT dapat dijelaskan dengan uraian sebagai berikut [58]. Film yang menerima proyeksi sinar-X diganti dengan detektor radiasi yang dapat merekam semua berkas sinar secara berdispensiasi. Perekaman dilakukan dengan mengombinasikan tiga perangkat detektor, dua di antaranya menerima sinar yang telah menembus tubuh dan yang satu berfungsi sebagai detektor aferen yang mengukur intensitas sinar-X yang telah menembus tubuh. Penyinaran dilakukan menurut proyeksi dari tiga titik, yaitu posisi jam 12, 10 dan 02 dengan memakan waktu 4,5 menit. Media kontras sering digunakan untuk menggambarkan anatomi dan memungkinkan rekonstruksi 3D struktur, seperti arteri dan vena. Meskipun resolusi radiografi lebih tinggi untuk pencitraan tulang kerangka, pemindai CT dapat pula menghasilkan gambar yang jauh lebih rinci dari jaringan lunak.

Sinar-X yang mengalami atenuasi setelah menembus objek diteruskan ke detektor dengan kepekaan sangat tinggi dalam menangkap perbedaan atenuasi yang dialami sinar tersebut. Detektor kemudian mengubah sinar-X menjadi sinyal-sinyal elektrik. Sinyal selanjutnya diperkuat oleh *photomultiplier tube*. Data dalam bentuk sinyal-sinyal listrik tersebut selanjutnya diubah ke dalam bentuk data digital oleh *analog to digital converter* (ADC), yang kemudian masuk ke dalam sistem komputer untuk diolah lebih lanjut. Selanjutnya perangkat *data acquisition system* (DAS) melakukan pengolahan data dalam bentuk data-data digital atau numerik. Data-data inilah yang menjadi masukan untuk komputer. Dengan rumus matematika atau algoritma, data masukan selanjutnya direkonstruksi dan hasil rekonstruksinya ditampilkan pada layar monitor dalam bentuk irisan-irisan tomografi dari objek yang dicitrakan dalam bentuk *gray scale image*.

Tujuan penggunaan pemindai CT adalah untuk menemukan patologi dengan teknik pemindaian atau pemeriksaan tanpa radioisotop. Teknik ini hampir dapat digunakan untuk menilai semua organ dalam tubuh, bahkan di negara maju sudah digunakan sebagai alat *screening* menggantikan foto sinar-X dan USG. Berat badan pasien merupakan suatu hal yang harus dipertimbangkan dalam penggunaan pemindai CT. Mengingat keterbatasan tingkat kekuatan pemindai, maka berat badan maksimum dari pasien yang dapat dilakukan pemeriksaan dengan pemindai CT adalah 145 kg. Mengingat untuk pemindaian CT diperlukan dosis radiasi yang lebih tinggi dibandingkan foto sinar-X konvensional, maka ibu hamil wajib memberitahu kondisi kehamilannya sebelum pemeriksaan dilakukan.

Faktor terpenting pada pemeriksaan dengan pemindai CT adalah pasien yang akan melakukan pemeriksaan harus bersikap kooperatif, tenang dan tidak bergerak saat proses perekaman. Karena itu, dikaitkan dengan lamanya pemeriksaan, sebelumnya harus dipastikan terlebih dahulu apakah pasien mempunyai kesanggupan untuk diam tanpa mengadakan perubahan posisi selama 20 hingga 25 menit. Artefak atau gambaran yang seharusnya tidak ada tapi terekam biasanya timbul karena pasien bergerak selama pemindaian.

Pemindai CT hadir untuk memenuhi kebutuhan sarana pemeriksaan kesehatan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Pemeriksaan dengan teknik ini sangat cocok dan banyak digunakan untuk [60]:

- Kasus trauma/cedera misalnya trauma kepala, trauma tulang belakang dan trauma lainnya pada kecelakaan. Penilaian ini biasanya harus dilakukan bila timbul penurunan kesadaran, muntah, pingsan, atau timbulnya gejala gangguan saraf lainnya.
- Membantu proses biopsi jaringan atau proses pengeluaran cairan yang menumpuk di dalam tubuh. Dalam kegiatan ini pemindai CT berperan sebagai alat bantu penglihatan bagi dokter untuk melihat lokasi yang tepat guna melakukan tindakan.
- Mengamati pertumbuhan tumor atau kanker, misal pengamatan metastasis atau penyebaran sel kanker, letak kanker dalam organ, dan jenis kanker.
- Menilai organ dalam, misal pada stroke, gangguan organ pencernaan dan lain-lain.
- Menilai kondisi pembuluh darah yang perlu dilakukan pada diagnosis penyakit jantung koroner, emboli paru, aneurisme (pembesaran pembuluh darah) aorta dan berbagai kelainan pembuluh darah lainnya.
- Alat bantu pemeriksaan bila hasil yang dicapai dengan pemeriksaan radiologi lainnya kurang memuaskan atau ada kondisi yang tidak memungkinkan untuk melakukan pemeriksaan kecuali dengan pemindai CT.

Harus dilakukan pengkajian terhadap pasien sebelum dilakukan pemeriksaan untuk memastikan bahwa pasien bebas dari alergi iodin (I), karena pada pasien yang akan diperiksa perlu menjalani penyuntikan dengan zat kontras mengandung I sebanyak 30 ml. Karena eliminasi medium kontras dari dalam tubuh perlu waktu hingga 24 jam, maka kondisi ginjal pasien harus dalam keadaan normal. Adapun kelebihan yang dapat diperoleh dari pemeriksaan dengan pemindai CT ini adalah [58]:

- Gambar yang dihasilkan memiliki resolusi yang baik dan akurat.
- Tidak invasif (tindakan non-bedah).
- Waktu perekaman relatif cepat.
- Gambar yang direkonstruksi dapat dimanipulasi dengan komputer sehingga dapat dilihat dari berbagai sudut pandang.

#### 4.5. Pemeriksaan Kepadatan Tulang

Tulang memiliki peran sangat penting bagi aktivitas kehidupan manusia. Tulang sudah mulai terbentuk sejak bayi dalam kandungan, prosesnya berlangsung terus menerus hingga susunannya menjadi teratur dan kuat. Jaringan tulang tersusun atas beberapa bentuk sel tulang yang terdapat dalam cairan ekstraseluler (matriks) berupa garam-garam anorganik (sebagian besar berupa kalsium dan fosfor). Garam-garam inilah yang memberikan kekuatan pada tulang dan serabut kolagen yang memberikan sifat elastis pada tulang. Hampir seluruh kalsium (99 persen) pada tubuh tersimpan di dalam tulang [61].

Tulang kerangka tubuh manusia terdiri atas berbagai jenis jaringan, termasuk tulang kompak, tulang spons, sumsum tulang, dan periosteum. tulang kompak membentuk lapisan luar tulang yang padat. Tulang kompak sangat keras dan kuat. Tulang spons ditemukan di dalam tulang dan lebih ringan serta kurang padat dibanding tulang kompak. Hal ini terjadi karena tulang spons berpori. Dalam tulang terdapat darah, saraf, dan segala macam sel dan protein, yang semua itu menjadikannya sebagai jaringan hidup yang sangat kompleks.

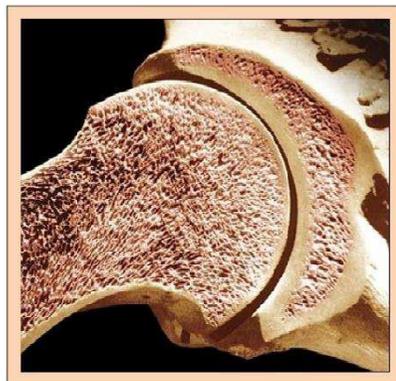
Rangka merupakan susunan tulang-tulang yang berkesinambungan, tidak dapat dilihat dari luar tubuh karena ditutupi oleh daging (otot) yang berperan dalam melindungi organ dalam tubuh yang lunak. Jumlah tulang pembentuk rangka pada manusia lebih kurang 206 ruas tulang. Rangkaian tulang-tulang inilah yang membuat manusia dapat berdiri tegak. Rangka juga memiliki beberapa peran penting lainnya, seperti: memberi bentuk pada tubuh, menjadi tempat melekat daging (otot) dan jaringan, menjadi tempat penyimpanan mineral (terutama fosfor dan kalsium) dan energi, berperan sebagai tempat pembentukan sel darah merah (*eritrosit*), sel darah putih (*leukosit*), dan keping darah (*trombosit*), sebagai alat gerak pasif dalam arti rangkaian tulang tidak bergerak, melainkan gerakannya dapat terjadi jika adanya kontraksi atau relaksasi dari otot yang melekat pada tulang, juga berperan melindungi organ-organ vital tubuh, seperti jantung dan paru dilindungi oleh tulang rusuk (*costae*) dan tulang dada (*sternum*), sedang otak dilindungi oleh tulang kepala (*cranium*).

Jika terjadi gangguan sedikit saja pada tulang, maka aktivitas kehidupan manusia pasti ikut terganggu. Penyakit tulang merupakan suatu

kondisi yang merusak kerangka dan membuat tulang lemah dan rentan terhadap fraktur yang berakibat pada penuaan tulang. Fraktur adalah tipe yang paling menghancurkan penuaan tulang. Penyakit-penyakit tertentu dapat merusak rangka akibat pemeliharaan tulang yang tidak baik, seperti polio, rakitis, rematik, TBC tulang, osteoporosis dan beberapa penyakit lain [62].

Penyakit tulang yang paling umum adalah osteoporosis yang ditandai dengan berkurangnya kerapatan tulang dan kerusakan struktur. Penurunan kerapatan itu disebabkan oleh kehilangan mineral seperti kalsium. Secara harfiah, osteoporosis berarti lubang di dalam tulang. Istilah ini diperkenalkan oleh Jean G. Lobstein (1777-1835) pada sekitar awal abad ke-19. Pada 1940, dokter Amerika dan endokrinologi Fuller Albright (1900-1969) menggambarkan osteoporosis sebagai postmenopausal dan mengusulkan bahwa penyakit itu adalah konsekuensi dari terganggunya pembentukan tulang karena kekurangan estrogen [63].

Menurut WHO (1994), osteoporosis adalah penyakit tulang sistemis yang ditandai dengan penurunan kualitas dan kepadatan massa tulang, sehingga menyebabkan tulang menjadi rapuh dan mudah patah. Sering juga disebut dengan tulang keropos seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Penyakit ini mempunyai sifat-sifat khas berupa massa tulang yang rendah, disertai mikro arsitektur tulang dan penurunan kualitas jaringan tulang yang akhirnya dapat menimbulkan kerapuhan tulang [62].



Gambar 4.6 Tulang dapat keropos karena penurunan kualitas dan kepadatan massa tulang [64]

Osteoporosis hampir tidak menunjukkan gejala dan menyerang secara diam-diam sehingga sering disebut sebagai *silent disease*. Namun terdapat gejala-gejala umum serangan osteoporosis, seperti [62]:

- Kepadatan tulang berkurang secara perlahan, terutama pada penderita osteoporosis senilis, sehingga pada awalnya tidak menimbulkan gejala. Jika kepadatan tulang menjadi sangat berkurang, tulang menjadi hancur, timbul nyeri tulang dan kelainan bentuk.
- Kolaps tulang belakang yang menyebabkan nyeri punggung menahun. Tulang belakang yang rapuh bisa mengalami kolaps secara spontan atau karena cedera ringan. Biasanya nyeri timbul secara tiba-tiba dan dirasakan di daerah tertentu dari punggung, yang akan bertambah nyeri jika penderita berdiri atau berjalan. Jika disentuh, daerah tersebut akan terasa sakit, tetapi biasanya rasa sakit ini akan menghilang secara bertahap setelah beberapa minggu atau beberapa bulan. Jika beberapa tulang belakang hancur, maka akan terbentuk kelengkungan abnormal dari tulang belakang yang menyebabkan ketegangan otot dan terasa sakit.
- Tulang lainnya bisa mudah patah hanya disebabkan oleh tekanan ringan atau karena jatuh. Salah satu cedera tulang paling serius adalah patah tulang panggul. Yang juga sering terjadi adalah patah tulang lengan (radius) di daerah persambungannya dengan pergelangan tangan yang disebut fraktur Colles. Selain itu, pada penderita osteoporosis, patah tulang cenderung pulih secara perlahan.

Penyakit osteoporosis mungkin telah ada sepanjang sejarah manusia. Kini dikenal ada dua bentuk osteoporosis, satu terkait dengan defisiensi estrogen pada menopause dan lainnya disebabkan oleh kekurangan kalsium dan penuaan dari kerangka. Faktor-faktor ini, ditambah dengan peningkatan risiko jatuh, berkontribusi terhadap tingginya insiden patah tulang pada pasien osteoporosis. Pada osteoporosis, kualitas dan kepadatan jaringan tulang di dalam tulang akan memburuk, disertai mikro arsitektur tulang, sehingga terdapat lebih banyak ruang kosong di dalamnya dan menjadikan tulang lebih rapuh [62].

Pada umumnya serangan osteoporosis terjadi pada tulang kortikal (bagian luar) maupun trabekula (bagian dalam), sehingga kedua lapisan tersebut menjadi tipis dan rapuh. Sebagai akibat osteoporosis, tulang lebih mudah untuk patah (fraktur) meskipun hanya disebabkan oleh kecelakaan atau jatuh ringan. Tulang yang paling berisiko patah pada penderita osteoporosis adalah tulang pergelangan tangan, tulang panggul, dan tulang punggung (tulang belakang). Bahkan pada kondisi osteoporosis yang parah, batuk yang keras pun dapat menyebabkan patah tulang belakang [63].

Dalam tubuh yang sehat, kadar kalsium akan selalu dipertahankan dalam batas normal dengan berlangsungnya proses homeostasis kalsium, yaitu suatu proses untuk menarik kalsium dari sumber makanan yang kemudian dirubah menjadi cairan ekstra sel yang diserap oleh tulang. Wanita memiliki risiko osteoporosis yang jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan pria. Hal ini dikarenakan oleh kerangka tulang pada wanita umumnya lebih kecil dan aktivitas fisik wanita pun tidak sebesar aktivitas pada pria. Selain itu, ketika wanita sudah memasuki usia menopause pada usia 50 tahun ke atas, produksi hormon estrogen akan berkurang. Setelah kondisi ini terjadi selama kurun waktu 5 – 10 tahun ke depan, proses pengeroposan tulang pun mulai terjadi. Tentu saja bagi wanita, hal ini harus diantisipasi dengan tindakan pencegahan [62].

Kepadatan mineral tulang ditentukan oleh jumlah kalsium dan mineral tulang lainnya (dalam miligram) yang terkumpul dalam setiap satuan luas (dalam  $\text{cm}^2$ ) bagian tulang. Semakin tinggi kandungan mineralnya, semakin padat massa tulang dan semakin kuat tulang seseorang. Perkembangan teknologi kedokteran yang pesat telah menghasilkan teknik-teknik noninvasif untuk mengukur kepadatan mineral tulang. Beberapa penderita osteoporosis tidak merasakan gejala-gejala khusus. Penyakit ini diketahui setelah melakukan pemeriksaan tulang dengan sinar-X. Bila seseorang merasa khawatir bahwa dirinya mungkin berisiko mengalami osteoporosis, jalan terbaik adalah mengunjungi dokter untuk konsultasi kesehatan. Dokter akan bertanya mengenai apakah pernah mengalami patah tulang atau ada riwayat osteoporosis dalam keluarganya. Bila dokter mencurigai pasien mungkin mengalami osteoporosis, maka langkah nyata satu-satunya untuk mendiagnosisnya adalah melalui suatu

jenis pemeriksaan yang disebut *dual X-ray absorptiometry (DXA) scan* [65].

Perangkat DXA dapat secara langsung mengukur kepadatan tulang panggul dan punggung. Pemeriksaan ini digunakan untuk mendiagnosis osteoporosis, risiko keretakan/patah tulang, dan mengukur respons seseorang terhadap pengobatan osteoporosis. Pasien dapat mengulang tes setiap satu atau dua tahun. Melalui tes ini memungkinkan dokter untuk mendiagnosis osteoporosis dan memberikan pengobatan yang tepat bagi penderita. Biasanya tes dilakukan pada tulang yang mudah patah seperti tulang punggung bagian bawah, tulang paha (leher sempit sebelah sendi pinggul) dan tulang-tulang di lengan. Namun kepadatan tulang berbeda di bagian tubuh lainnya. Jika hasil tes di salah satu tulang menunjukkan seseorang memiliki penyakit tulang, dokter mungkin akan memeriksa tulang bagian lain juga. Tes tulang dapat digunakan untuk mengukur kepadatan tulang. Dari hasil tes ini memungkinkan dokter untuk [66]:

- Melihat apakah pasien memiliki tulang lemah atau osteoporosis sebelum kondisi semakin serius.
- Memprediksi dan mengurangi kemungkinan patah tulang di masa depan.
- Melihat apakah pengobatan untuk meningkatkan kepadatan tulang telah meningkatkan kondisi perbaikan tulang.
- Mencari tahu apakah pengobatan untuk osteoporosis bekerja dengan baik.

Metode yang dipakai dalam pengukuran kepadatan tulang ini adalah teknik *photon absorptiometry*. Pengukuran kerapatan tulang dilakukan dengan cara menyinari tulang dengan sinar-X. Prinsip dasar dalam pengukuran ini adalah bahwa banyaknya sinar-X yang menembus ataupun diserap oleh jaringan tulang bergantung pada massa, kerapatan tulang yang dilewati dan koefisien pelemahan radiasi oleh tulang [66]. Teknik pemeriksaan ini dapat membantu dalam mendiagnosis gejala osteoporosis. Kasus osteoporosis ditemukan cukup tinggi pada kelompok ras Kaukasoid sehingga para dokter menyarankan perlu adanya upaya pencegahan dengan cara pemberian hormon estrogen. Pengukuran kerapatan tulang dengan metode *photon absorptiometry* ini dapat juga digunakan untuk mendeteksi adanya patah tulang yang membahayakan.

Tulang belakang dan pinggul dikelilingi oleh sejumlah jaringan lunak, termasuk lemak, otot, pembuluh darah, dan organ-organ perut. Dengan densitometer DXA memungkinkan dokter untuk mengukur massa tulang yang tersembunyi itu dengan memanfaatkan perbedaan atenuasi sinar-X energi rendah dan energi tinggi oleh mineral tulang dan jaringan lunak. Perangkat pemindai DXA merupakan peralatan standar untuk diagnosis osteoporosis karena dapat memberikan hasil pengukuran dengan akurasi sangat tinggi hingga mencapai 98-99 persen [66]. Pengujian itu dilakukan dengan perangkat DXA pada tulang yang berisiko patah karena osteoporosis.

Pemindaian dengan DXA memakan waktu beberapa menit, tanpa pembiusan, tanpa suntikan, tidak menimbulkan rasa sakit, dan hanya memberi paparan radiasi dengan dosis rendah, nilainya jauh di bawah dosis sinar-X untuk foto toraks. Namun demikian, menurut rekomendasi *International Society of Clinical Densitometry* (ISCD), pemindaian dengan DXA untuk *screening* dan diagnosis sebaiknya tidak dilakukan lebih dari sekali dalam dua tahun. Versi portabel dari perangkat ini sering digunakan untuk *screening* kepadatan tulang di klinik-klinik dan arena pameran kesehatan. Namun karena alat itu hanya memindai bagian tulang yang lebih kecil, misal hanya pada bagian tumit atau jari saja, maka hasilnya tidak seakurat data yang diperoleh dari pemindaian dengan DXA standar.

#### **4.6. Mamografi**

Gangguan kesehatan yang paling mengancam wanita dan perlu diwaspadai adalah kanker leher rahim dan payudara, terutama bagi wanita yang mengalami menstruasi pertama sebelum usia 12 tahun, berhenti menstruasi di atas usia 50 tahun, atau memiliki riwayat keturunan penderita kedua penyakit ini [67]. Wanita yang sering berganti pasangan dalam berhubungan seksual lebih mudah untuk terserang kanker leher rahim, sedang wanita yang belum pernah melahirkan berisiko lebih besar untuk menderita kanker payudara.

Membiarkan benjolan di payudara tanpa dibarengi dengan pemeriksaan medis sepertinya menjadi kesalahan umum bagi kaum wanita [67]. Bisa saja, benjolan tersebut merupakan pertanda munculnya kanker. Membiarkan benjolan aneh tersebut nantinya bisa jadi harus dibayar

mahal, karena ada kemungkinan benjolan itu pertanda munculnya kanker payudara dan penderitanya harus melakukan terapi dengan jalan operasi, radiasi dan kemoterapi untuk penyembuhannya. Meskipun 90 persen kemunculan benjolan di payudara belum mengindikasikan kanker, ada peluang bahwa 10 persen benjolan itu akan berkembang menjadi kanker payudara. Karena itu dibutuhkan pemeriksaan medis lebih lanjut untuk memastikan adanya sel kanker.

Pada dasarnya, kanker payudara bersumber dari sel-sel yang terdapat pada jaringan payudara. Keganasan sel ini bisa merambat ke organ tubuh lain, seperti tulang, hati, paru dan otak. Kanker payudara menyerang sekitar 99 persen wanita, satu persen sisanya adalah pria. Wajarlah bila kaum hawa dituntut untuk memiliki kewaspadaan yang tinggi terhadap potensi serangan kanker ini. Di Indonesia, berdasarkan data yang dirilis oleh Sistem Informasi Rumah Sakit (SIRS) 2010, kanker payudara merupakan jenis kanker tertinggi pada pasien rawat inap dan rawat jalan dengan jumlah mencapai 12.014 penderita (28,7 persen), disusul kanker serviks dengan jumlah 5.349 penderita (12,8 persen).

Kanker payudara lebih berisiko pada wanita muda dibanding wanita yang mulai memasuki atau melewati fase menopause. Pada wanita muda, perkembangan sel kanker tersebut cenderung berlangsung lebih agresif. Mendeteksi dini munculnya kanker adalah cara efektif menghindari kanker payudara. Cara pertama yang dianjurkan adalah melakukan pemeriksaan payudara sendiri. Jika dilakukan setiap hari, kaum hawa akan lebih mudah menemukan benjolan yang tidak biasa. Termasuk kejadian normal jika ada benjolan di sekitar payudara saat menjelang menstruasi yang disebabkan perubahan hormon. Namun jika benjolan tersebut tidak hilang setelah selesainya masa menstruasi, maka jalan terbaik berikutnya adalah segera memeriksakan diri ke dokter ahli.

Bila pada diri seseorang muncul gejala-gejala serangan kanker payudara, sangat dianjurkan pada orang tersebut untuk segera memeriksakan diri ke dokter [67]. Untuk memastikan adanya kanker payudara biasanya dilakukan biopsi, yaitu dengan mengambil sampel jaringan sel payudara yang menjadi tempat di mana benjolan tumbuh. Berdasarkan hasil pemeriksaan itu penanganan medis dapat segera dilakukan sedini mungkin bergantung pada jenis dan tingkatan kanker

yang diderita. Berikut adalah beberapa gejala kanker payudara yang patut diwaspadai oleh kaum hawa, yaitu:

- Munculnya benjolan permanen, yang keras dan tidak terasa sakit saat ditekan.
- Terjadi penebalan kulit di payudara atau sekitar ketiak.
- Perubahan ukuran dan bentuk payudara.
- Adanya kerutan di kulit payudara.
- Keluarnya cairan darah dari puting.
- Puting terasa ada tarikan.

Pada penyakit kanker dikenal istilah faktor risiko, yaitu faktor yang bila ada pada seseorang akan meningkatkan kemungkinan terkena kanker. Salah satu faktor risiko pada kanker payudara adalah faktor keluarga, yaitu bila pada suatu keluarga besar ditemukan adanya penderita kanker payudara, terutama ibu kandungnya, maka anak perempuannya memiliki risiko tinggi terkena kanker payudara. Walaupun belum mutlak pasti terkena kanker payudara dikemudian hari, namun risiko untuk terkena lebih tinggi dibandingkan wanita lain yang orang tuanya tidak menderita kanker payudara.

Tiga macam upaya yang sangat penting dalam penanggulangan kanker payudara adalah: pencegahan, deteksi dini dan pengobatan [68]. Upaya pencegahan sangat sulit dilaksanakan mengingat belum ditemukannya penyebab tunggal kanker payudara. Deteksi dini sangat penting karena akan menemukan kanker payudara dalam stadium dini, sehingga akan meningkatkan keberhasilan pengobatan dan menurunkan angka kematian akibat kanker payudara. Karena dengan deteksi dini yang baik, kanker payudara akan ditemukan dengan ukuran seminimal mungkin atau sedini mungkin.

Teknik paling umum untuk deteksi awal kanker payudara adalah melalui pemeriksaan dengan mamografi dan USG payudara. Di antara cara-cara deteksi dini tersebut, ternyata yang memiliki angka ketepatan paling tinggi untuk mendeteksi kanker payudara ukuran kecil adalah dengan mamografi [69]. Pemeriksaan klinis saja sensitivitasnya sekitar 40-50 persen, sedangkan mamografi sensitivitas mendekati 80-90 persen. Bila

mamografi digabungkan dengan USG, ketepatan bertambah menjadi 98 persen.

Mamografi adalah tindakan pemeriksaan payudara dengan bantuan sinar-X. Pesawat sinar-X mamografi didesain memancarkan sinar-X dengan energi dan dosisnya sangat rendah sehingga aman dan tidak memengaruhi kesehatan pada orang yang diperiksa. Prosedur pemeriksaan mamografi digunakan untuk *screening* dan diagnosis kanker payudara. Tujuannya adalah untuk mendeteksi ada tidaknya proses keganasan di payudara, atau untuk menemukan proses lain selain keganasan sebelum timbulnya gejala [69].

Diagnosis dengan mamografi adalah pemeriksaan melalui pencitraan dengan sinar-X dari payudara seorang wanita yang telah memiliki keluhan payudara atau terdeteksi adanya abnormalitas pada hasil mamografi *screening* [70]. Sebagaimana penggunaan sinar-X lainnya, mamografi menggunakan radiasi pengion untuk menghasilkan citra. Mamografi diagnostik dilakukan lebih rinci dan memakan waktu lebih lama dibandingkan dengan mamografi *screening*. Teknik pemeriksaan dengan mamografi dapat mengungkapkan serangan kanker di payudara jauh sebelum bisa dirasakan atau diraba. Gambar hasil pencitraan dengan teknik mamografi disebut *mammogram* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Radiolog kemudian menganalisis gambar untuk menemukan adanya pertumbuhan yang abnormal.



Gambar 4.7 Deteksi dini kanker payudara dengan mamografi [71]

Di dunia medis, mamografi digunakan untuk melihat beberapa tipe tumor dan kista, dan telah terbukti dapat mengurangi mortalitas akibat kanker payudara [67]. Terdapat dua jenis mamografi, yaitu:

- *screen-film mammography* di mana hasil pencitraannya dilakukan menggunakan film fotografi yang harus dicetak.
- *full-field mammography* di mana hasil pencitraannya dapat dilihat di layar monitor secara digital dan dapat dicetak langsung jika diperlukan.

Pemeriksaan mamografi biasanya direkomendasikan kepada setiap wanita berusia di atas 40 tahun, atau di bawah 40 tahun jika disinyalir mempunyai faktor risiko terkena kanker payudara, misal karena ada salah satu anggota keluarga besarnya yang pernah menderita kanker payudara. Beberapa negara telah menyarankan mamografi rutin bagi perempuan yang telah melewati paruh baya sebagai metode *screening* untuk mendiagnosis kanker payudara sedini mungkin [67]. Pemeriksaan seperti ini direkomendasikan untuk digunakan dalam waktu sekali selama 2-4 tahun bila usia seorang wanita masih di bawah 39 tahun. Namun saat usia menginjak umur 40 tahun ke atas, pemeriksaan justru dianjurkan dilakukan rutin setahun sekali. Bila seorang wanita termasuk kelompok berisiko tinggi, dokter akan menyarankan agar melakukan pemeriksaan lebih sering. American Cancer Society dan National Cancer Institute menganjurkan untuk melakukan pemeriksaan mamografi sekali setahun bagi wanita dengan usia di atas 40 tahun.

Mamografi diagnostik selain digunakan untuk menentukan ukuran dan lokasi kelainan payudara, juga untuk mendapatkan gambaran jaringan dan kelenjar getah bening di sekitarnya. Deteksi dini kanker payudara dengan teknik mamografi dapat dilakukan baik setelah muncul keluhan maupun tanpa disertai keluhan sama sekali. Pada saat ini, mamografi masih menjadi standar terbaik untuk *screening* dini kanker payudara dan direkomendasikan banyak dokter di dunia. Pemeriksaan dengan USG, *ductography*, dan resonansi magnetik merupakan beberapa teknik lain yang juga digunakan untuk memperkuat hasil mamografi. *Ductography* digunakan untuk mengevaluasi darah yang keluar dari puting, sedang *magnetic resonance imaging* (MRI) digunakan untuk evaluasi lanjutan atau sebelum operasi untuk melihat adanya daerah abnormal lainnya.

Mamografi merupakan alat terbaik untuk *screening* atau deteksi dini kanker payudara, karena sinar X pada mamografi mempunyai kemampuan menembus jaringan payudara yang mengalami kelainan dan mampu menunjukkan kelainan tersebut secara memuaskan [67]. Bagi negara-negara maju di kawasan Eropa Barat dan Amerika Serikat, mamografi sudah sangat populer dan merupakan alat yang peka untuk mendeteksi kelainan khususnya kanker payudara. Di kedua kawasan tersebut, pemanfaatan mamografi untuk deteksi dini berhasil menurunkan 25-30 persen angka kematian akibat kanker payudara. Sedang bila dijumpai kanker payudara pada *screening*, maka harapan hidup pengidapnya dapat meningkat 3,5 tahun dibandingkan rata-rata harapan hidup penderita kanker payudara. Jelaslah bahwa program deteksi dini dengan mamografi merupakan jawaban yang tepat saat ini untuk menurunkan angka kematian akibat kanker payudara.

#### **4.7. Fluoroskopi**

Fluoroskopi adalah cara pemeriksaan yang mengandalkan sifat tembus sinar-X dan penangkapan bayangan oleh suatu tabir yang bersifat luminesensi bila terkena paparan sinar tersebut. Pemeriksaan ini umumnya digunakan untuk studi visual (langsung) dari jatuhnya bayangan laten pada layar fluoroskopi menjadi bayangan permanen pada film atau spot film. Dalam aplikasi medik, fluoroskopi digunakan untuk memvisualisasikan gerakan dari struktur-struktur organ internal dalam tubuh [72]. Radiolog maupun dokter spesialis radiologi dapat mengamati secara langsung gambaran struktur organ secara dinamik (*real time imaging*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8. Selain itu, mereka dapat pula mengambil gambar dengan film fotografi saat pemeriksaan fluoroskopi berlangsung.



Gambar 4.8 Pemeriksaan fluoroskopi untuk mengamati pergerakan organ tubuh secara langsung [73]

Pemeriksaan fluoroskopi digunakan untuk studi dan deteksi pergerakan bagian tubuh selama tindakan medis dengan memosisikan bagian tubuh secara optimal agar didapatkan citra yang lebih baik. Fluoroskopi utamanya diperlukan untuk menyelidiki fungsi serta pergerakan suatu organ atau sistem tubuh seperti dinamika alat peredaran darah, misalnya jantung, dan pembuluh darah besar, serta pernafasan berupa pergerakan diafragma dan aerasi paru-paru. Keuntungan dari pemeriksaan dengan fluoroskopi adalah dapat ditingkatkannya ketajaman gambar yang dihasilkan.

Peralatan utama pesawat sinar-X fluoroskopi terdiri dari generator dan tabung sinar-X, panel kontrol, penguat citra (*image intensifier*), dan monitor citra [72]. Dalam kegiatan fluoroskopi, tabung sinar-X diletakkan di bawah pasien yang berada di meja pemeriksaan. Di atas meja pemeriksaan terdapat penguat bayangan dan detektor serta perangkat pencitraan lainnya. Namun ada pula beberapa tipe pesawat fluoroskopi yang memiliki tabung sinar-X di atas pasien dan terdapat film di bawah meja pemeriksaan.

Beberapa tipe pesawat fluoroskopi dioperasikan dari jarak jauh di mana operator berada di luar ruang pemeriksaan. Selama pemeriksaan fluoroskopi berlangsung, tabung sinar-X dioperasikan tidak lebih dari 50

mAs. Meskipun menggunakan mA yang kecil, tetapi dosis yang diterima pasien akan lebih besar dibandingkan dengan pemeriksaan radiografi konvensional. Hal ini disebabkan karena sinar-X yang diemisikan oleh tabung pada pesawat fluoroskopi membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan tabung pada pesawat sinar-X konvensional. Pengaturan energi sinar-X yang digunakan untuk penyinaran dilakukan melalui pengaturan tegangan puncak tabung pesawat (pengaturan kVp), nilainya bergantung pada organ yang akan diperiksa.

Pada saat pemeriksaan fluoroskopi berlangsung, berkas sinar-X primer menembus tubuh pasien menuju *input screen* (layar masukan) yang berada dalam *image intensifier tube*, yaitu sebuah tabung hampa udara yang terdiri atas katoda dan anoda. *Input screen* adalah layar yang menyerap foton sinar-X dan mengubahnya menjadi berkas cahaya tampak, yang kemudian ditangkap oleh tabung pelipat ganda cahaya atau PMT (*photo multiplier tube*). Dalam PMT terdapat *photocathode*, *focusing electrode*, anoda dan *output phosphor*.

Cahaya tampak yang mengenai permukaan *photocathode* akan menyebabkan terjadinya pelepasan elektron yang selanjutnya diarahkan menuju *focusing electrode* untuk difokuskan dan gerakannya dipercepat menuju *dynode* yang berperan sebagai anoda. Elektron-elektron dari *photocathode* akan menumbuk *dynode* pertama dan dalam proses tumbukan itu akan menghasilkan elektron-elektron sekunder lainnya. Elektron-elektron yang telah diperbanyak jumlahnya dan keluar dari *dynode* pertama selanjutnya akan dipercepat menuju *dynode* kedua sehingga akan menghasilkan elektron sekunder yang jumlahnya lebih banyak lagi, demikian seterusnya hingga terjadi pelipatgandaan (*avalans*) jumlah elektron pada saat mencapai permukaan *dynode* yang terakhir.

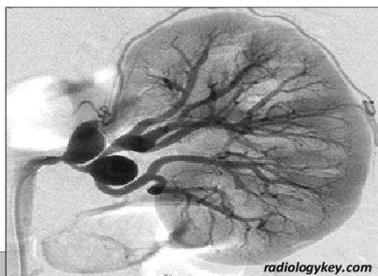
Dari *dynode* terakhir, elektron selanjutnya diarahkan menuju ke anoda yang nantinya diubah menjadi pulsa listrik. Pulsa listrik akan diteruskan ke *amplifier* untuk diperkuat dan diperbanyak jumlahnya. Pulsa-pulsa yang telah diperkuat selanjutnya diteruskan menuju ke perangkat elektronik bernama ADC (*analog to digital converter*). Oleh ADC pulsa-pulsa listrik ini selanjutnya diubah menjadi data digital yang dapat ditampilkan pada layar monitor dalam bentuk gambar citra hasil fluoroskopi. Dengan teknik itu pemeriksaan fluoroskopi dapat dipakai oleh

dokter untuk mengamati bagian dalam tubuh pasien melalui layar monitor secara langsung dan dinamik. Selama pemeriksaan, paparan sinar-X dilakukan secara kontinyu pada bagian tubuh yang diperiksa sehingga bagian tubuh itu dan pergerakannya bisa diamati secara langsung. Fluoroskopi dapat memberikan diagnosis aktif selama pemeriksaan sedang berlangsung.

Pemeriksaan fluoroskopi umumnya digunakan untuk mengevaluasi dan mengamati fungsi fisiologis tubuh yang bergerak [74]. Radiografer maupun dokter spesialis radiologi dapat melihat dan mengamati gambar video pergerakan dari berbagai struktur organ tubuh tertentu secara dinamik (*real time imaging*) melalui layar fluoresens. Dokter juga dapat mengambil gambar radiograf saat dilakukan fluoroskopi (*spot film*).

Fluoroskopi utamanya diperlukan untuk menyelidiki fungsi serta pergerakan suatu organ atau sistem tubuh seperti dinamika alat peredaran darah, misal jantung dan pembuluh darah besar, serta sistem pernafasan berupa pergerakan diafragma dan aerasi paru. Fluoreskopi dada merupakan sejenis pemeriksaan sinar-X yang dilakukan untuk melihat fungsi paru serta struktur lainnya pada sistem saluran pernafasan, seperti mengevaluasi pergerakan paru, diafragma, atau struktur lainnya di dalam dada. Namun, fluoroskopi ini memberikan paparan radiasi yang lebih besar dibandingkan dengan foto toraks biasa, sehingga penggunaan pemeriksaan ini harus dipertimbangkan dengan saksama.

# 5



## RADIOLOGI INTERVENSIONAL

Tubuh manusia terdiri atas enam triliun sel yang terdiferensiasi dalam beberapa kelompok. Setiap kelompok sel menjalankan fungsi dan tugasnya masing-masing. Namun hanya sel-sel sehat serta aktif saja yang mampu menjalankan fungsinya secara sempurna, yaitu mempertahankan fungsi organ tubuh [75]. Ada empat unsur dasar agar tubuh manusia tetap normal dan mampu bertahan dalam keadaan baik, yaitu asupan gizi yang seimbang, tidur yang cukup, olah raga secara teratur dan suasana hati yang senang. Namun sebagian masyarakat modern ternyata tidak selalu mampu mempertahankan kondisi itu secara seimbang karena berbagai hal, termasuk pola hidup yang tidak teratur. Sebagai akibatnya, berbagai jenis penyakit modern mengintai dan mengancam kesehatan tubuh manusia.

Semua pola penyakit dulu didominasi oleh penyakit infeksi dan kurang gizi. Namun, kini polanya telah tergantikan oleh penyakit modern yang muncul sebagai akibat dari perubahan gaya hidup. Kemakmuran telah mengubah cara pandang masyarakat dan melahirkan kebiasaan-kebiasaan baru. Berbagai kebiasaan baru yang tidak sesuai dengan prinsip pola hidup sehat telah memunculkan berbagai jenis penyakit baru yang tidak ditemukan sebelumnya, atau jumlah penderitanya meningkat dibandingkan dengan kurun waktu sebelumnya. Penyakit jantung koroner, stroke, diabetes melitus, obesitas, sindrom metabolik, depresi dan lain-lainnya merupakan contoh-contoh jenis penyakit modern akibat perubahan gaya hidup. Menurut prediksi Badan Kesehatan Dunia (WHO), penyakit

jantung koroner dan stroke yang kini menjadi penyebab utama kematian di beberapa negara maju, kelak akan menjadi penyebab utama kematian bagi masyarakat dunia.

Perkembangan ilmu dan teknologi telah mengantarkan pada kemajuan yang pesat dalam pelayanan kesehatan seiring dengan semakin kompleksnya masalah kesehatan masyarakat dunia. Sarana peralatan yang super canggih baik sebagai pendukung untuk diagnostik maupun terapi kini tersedia di rumah sakit dan penyedia jasa pelayanan kesehatan lainnya [76]. Kemajuan di bidang kedokteran modern terus berjalan seiring dengan perkembangan teknologi terbaru yang berdampak positif bagi pasien maupun dunia medis. Banyak metode pengobatan modern yang ditawarkan dalam rangka memberikan pelayanan kesehatan terbaik kepada pasien. Masyarakat secara umum mengenal pengobatan modern sebagai pengobatan yang dilakukan oleh tenaga medis profesional dan didukung oleh penggunaan alat-alat canggih berteknologi tinggi.

Salah satu pencapaian terkini dalam pelayanan kesehatan adalah teknik bedah akses minimal atau lebih dikenal dengan istilah *minimally invasive surgery* (bedah invasif minimal) [77]. Invasif adalah prosedur medis maupun keperawatan yang disertai dengan menyerang (memasuki) tubuh, biasanya dengan memotong atau menusuk kulit atau dengan memasukkan instrumen kesehatan ke dalam tubuh pasien. Bedah invasif minimal meliputi semua tindakan atau prosedur bedah yang dilakukan dengan membuat sayatan kecil pada kulit sebagai pembuka jalan masuk operasi. Metode ini berhasil dikembangkan karena hadirnya layanan radiologi yang kini dikelompokkan menjadi dua prosedur, yaitu radiologi diagnostik dan intervensional.

### **5.1. Jenis-jenis Kegiatan**

Radiologi diagnostik, sebagaimana telah dibahas pada Bab 4, adalah cabang ilmu radiologi yang berhubungan dengan penggunaan pesawat sinar-X untuk prosedur diagnostik saja. Sedangkan radiologi intervensional adalah cabang ilmu radiologi yang berhubungan dengan penggunaan pesawat sinar-X untuk suatu tindakan diagnostik maupun terapi dengan panduan alat pencitraan. Prosedur ini menjadi pilihan alternatif selain bedah pada berbagai kondisi yang dapat mengurangi kebutuhan perawatan

[77]. Jenis pesawat sinar-X yang biasa digunakan untuk radiologi intervensional meliputi pesawat konvensional, fluoroskopi, C-arm, U-arm, cinefluorografi dan CT. Dua layanan radiologi tadi saling mendukung karena pemeriksaan apapun dalam radiologi harus dilakukan tindakan diagnostik terlebih dahulu.

Berbeda dengan kegiatan radiologi diagnostik di mana dokter spesialis radiologi hanya membaca hasil foto yang dibuat oleh *radiographer*, dalam kegiatan radiologi intervensional ini dokter mengintervensi secara langsung pasiennya di tempat pemeriksaan. Terkait dengan kegiatan radiologi intervensional, Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) telah mengeluarkan terminologi untuk menggantikan istilah radiologi intervensional dengan istilah baru, yaitu fluoroskopi intervensional dan kardiologi intervensional.

Radiologi intervensional pertama kali dikembangkan pada 1964 oleh Charles T. Dotter (1920-1985), guru besar radiologi di Rumah Sakit Oregon Health and Science University, Amerika Serikat. Dalam praktik, radiologi *interventional* pada umumnya memanfaatkan anestesi lokal dan metode seldinger untuk mencapai tujuan dan tindakan. Ahli radiologi intervensional bekerja sama dengan dokter lain dalam suatu tim pengobatan pasien.

Dalam kegiatan pelayanan kesehatan, radiologi intervensional sering disingkat dengan IR (*interventional radiology*) atau VIR (*vascular and interventional radiology*). Tidak jarang juga ada kalangan yang menyebutnya dengan istilah *image-guided surgery* atau *surgical radiology* [78]. Sebutan itu tak terlepas dari posisinya sebagai sub-spesialisasi dari radiologi yang menyangkut prosedur-prosedur pemeriksaan bersifat bedah invasif minimal dengan panduan pencitraan. Beberapa prosedur IR dilakukan murni untuk tujuan-tujuan diagnostik saja, sedang yang lainnya dikerjakan untuk tujuan-tujuan penanganan atau pengobatan.

Pada dasarnya, tujuan utama dari IR adalah untuk mendiagnosis atau melakukan penanganan terhadap keadaan patologi dari pasien dengan mempertimbangkan kemungkinan penerapan teknik invasif paling minim. Metode IR telah berkembang pesat dan menjadi bagian penting dalam prosedur radiologi. Kini pelayanan IR cenderung lebih disukai oleh pasien karena pelaksanaannya tidak mengerikan dibanding dengan operasi

bedah secara terbuka. Dengan meminimalkan trauma secara fisik terhadap pasien, intervensi pada daerah perifer dapat mereduksi persentase kemungkinan terjadinya infeksi sehingga lebih aman, biaya pelayanan untuk tindakannya lebih murah, dan waktu penyembuhan pasien juga berlangsung lebih cepat.

Jika dilakukan intervensi bedah, proses penyembuhan pasien bisa berlangsung berminggu-minggu atau bahkan berorde bulan. Dengan metode IR, proses penyembuhan pasien hanya membutuhkan waktu dari orde beberapa jam hingga beberapa hari, setelah itu pasien dapat pulang sehingga mempersingkat waktu rawat inap di rumah sakit. Dibanding operasi bedah, metode IR memiliki beberapa keuntungan lain, seperti [79]:

- Berkurangnya ukuran luka.
- Berkurangnya rasa nyeri setelah operasi.
- Berkurangnya perdarahan yang keluar.
- Bekas luka atau jaringan parut yang lebih kecil.
- Meningkatkan keakuratan tindakan bedah.
- Mengurangi kemungkinan terjadinya infeksi.

Dokter yang terlibat dalam penanganan pasien memasukkan berbagai instrumen kecil atau alat, seperti kateter atau kawat pengarah, ke dalam tubuh pasien. Dalam kegiatan ini pencitraan dengan sinar-X digunakan untuk memandu secara langsung (*real time*) jalannya tindakan dalam prosedur *percutaneous*, yaitu akses menuju organ atau jaringan lain dalam tubuh yang dilakukan melalui tusukan jarum pada kulit. Tindakan yang dilakukan untuk memasukkan kateter ke dalam tubuh sering disebut dengan tindakan kateterisasi [77].

Kateter adalah sejenis komponen yang berfungsi sebagai pipa untuk memasukkan atau mengeluarkan sesuatu ke atau dari dalam tubuh. Kateter ini berbentuk selang kecil, tipis, sangat lentur dan fleksibel, umumnya dibuat dari bahan polimer (karet atau plastik), metal, *woven silk* dan silikon. Sebutan yang lebih spesifik biasanya dikaitkan dengan jenis organ yang ditangani. Jika yang ditangani jantung sering disebut kateterisasi jantung, yang ditangani ginjal disebut kateterisasi ginjal, untuk mengeluarkan urine disebut kateterisasi urin, dan untuk mempelajari otak disebut kateterisasi otak. Bahkan ruang angiografi yang fungsi utamanya

untuk pemeriksaan pembuluh darah sering disebut dengan *cathlab* (*catheterization laboratory*).

Prosedur IR banyak ditemui dalam pelaksanaan biopsi, pengeluaran cairan, pemasukan kateter, jarum suntik dan melakukan pelebaran terhadap saluran (*ductus*) atau pembuluh darah yang menyempit. Pencitraan dengan sinar-X dapat memberikan petunjuk jalan yang memudahkan dokter dalam mengarahkan instrumen kateterisasi di dalam tubuh menuju ke area sasaran yang mengandung penyakit atau kelainan. Adapun jenis-jenis layanan kesehatan yang sering dilakukan dengan bantuan prosedur IR adalah [79]:

- Angiogram, yaitu pengujian dengan sinar-X fluoroskopi untuk mengambil gambar aliran darah di dalam arteri (seperti aorta) atau vena (pembuluh darah balik). Kegiatan ini murni untuk tujuan diagnostik saja. Angiogram dapat digunakan untuk mengamati arteri maupun vena di kepala, lengan, kaki, dada, punggung maupun perut. Pengujian ini dapat dipakai untuk mengamati arteri dekat jantung (*coronary angiogram*), paru (*pulmonary angiogram*), otak (*cerebral angiogram*), kepala dan leher (*carotid angiogram*), lengan dan kaki (*peripheral*), dan aorta (*aortagram*). Diperlukan pesawat sinar-X dengan desain dan spesifikasi khusus yang dirancang untuk kegiatan IR. Pesawat sinar-X yang digunakan untuk kegiatan ini namanya angiografi, dan tindakan umum pada angiografi disebut DSA (*digital subtraction angiography*).
- Embolisasi, yaitu penyisipan suatu zat melalui kateter ke dalam pembuluh darah untuk menghentikan pendarahan, atau perdarahan yang berlebihan. Prosedur ini sering digunakan untuk mengatasi aneurisme, yaitu kelainan pembuluh darah otak yang muncul akibat penipisan dan degenerasi dinding pembuluh darah arteri. Penyebabnya adalah kelainan bawaan, hipertensi, dan adanya infeksi atau trauma. Kondisi ini menimbulkan kelemahan pada dinding pembuluh darah sehingga membentuk tonjolan seperti balon. Tonjolan dinding pembuluh darah tersebut lebih tipis dibandingkan dengan dinding pembuluh darah normal, sehingga dapat pecah kapan pun secara tiba-tiba. Pecahnya aneurisme sangat fatal karena dapat menyebabkan kematian akibat pendarahan otak. Pada

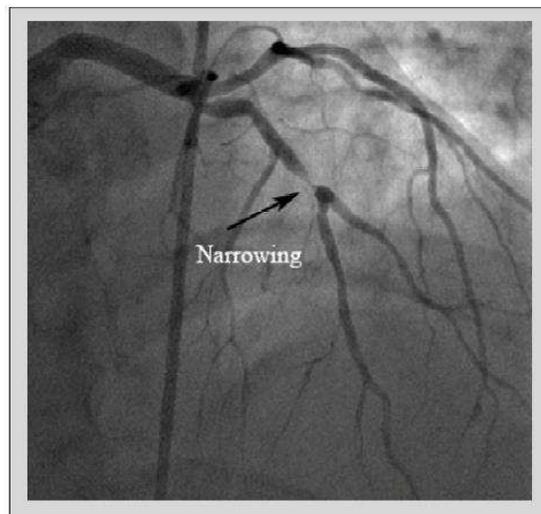
beberapa kasus, dapat terjadi kebocoran pada aneurisme dan menyebabkan rembesan darah ke otak. Pendarahan akibat kebocoran ini hampir selalu diikuti dengan pecahnya aneurisme yang lebih parah. Biasanya aneurisme yang masih utuh dan belum pecah tidak menimbulkan gejala sehingga sangat jarang ditemukan. Kalaupun ditemukan biasanya karena ketidaksengajaan, misal saat melakukan *medical check up*. Teknik terbaik untuk deteksi aneurisme adalah melakukan diagnosis dengan teknik angiografi, yaitu pemeriksaan pembuluh darah menggunakan kateter atau selang yang dimasukkan ke pembuluh darah dan diberi zat warna (kontras). Secara awam, embolisasi pada aneurisme ini mirip dengan cara menambal pipa bocor dengan bahan berupa butiran-butiran kecil *polyvinyl*. Aneurisme dapat ditangani dengan *clipping aneurysm* dan *coiling*. Tindakan *clipping aneurysm* adalah tindakan pembedahan untuk memasang *clip* pada leher aneurisme. Sedang tindakan *coiling* adalah teknik radiologi intervensi dengan memasukkan *coil* untuk menyumbat aneurisme. Tindakan yang diambil tentunya tergantung pada ukuran, bentuk, serta lokasi aneurisme. Embolisasi juga dapat dilakukan untuk terapi kanker dengan cara mematikan pembuluh darah yang menyuplai sari makanan kepada sel-sel kanker.

- Pemasukan *stent*, yaitu kumparan kecil yang terbuat dari bahan metal atau plastik dan dapat dipasang di lumen pembuluh darah. Kegiatan ini bertujuan untuk menempatkan *stent* di dalam pembuluh darah pada lokasi penyumbatan. *Stent* selanjutnya dikembangkan dengan metode *balloning* untuk membuka sumbatan. Sebagaimana umumnya dilakukan oleh dokter spesialis jantung, metode ini dilakukan untuk mengusahakan agar pembuluh darah tetap paten (tidak ada sumbatan), sehingga aliran darah tetap lancar.
- Biopsi, yaitu pengambilan jaringan dalam tubuh untuk keperluan pemeriksaan laboratorium. Biopsi digunakan untuk mengidentifikasi sel-sel abnormal dan untuk membantu mendiagnosis berbagai kondisi kesehatan yang berbeda atau untuk mengetahui jenis penyakit tertentu atau penyebab penyakit. Dalam kasus di mana suatu kondisi telah terdiagnosis, biopsi dapat digunakan untuk mengukur seberapa parah kondisi itu atau berada pada tahap apa

kondisi itu. Untuk menentukan suatu tumor berbahaya (ganas) atau tidak, diperlukan pemeriksaan biopsi.

- Trombolisis atau injeksi *clot-lysing agent*, yaitu kegiatan memasukkan filter kecil ke dalam bekuan darah untuk menangkap dan memecah gumpalan darah. Teknik ini dilakukan dengan cara menginjeksikan suatu bahan yang dapat melarutkan gumpalan bekuan darah yang berisiko menyumbat pembuluh darah. Contohnya adalah TPA (*tissue plasminogen activator*) yang disuntikkan ke dalam tubuh untuk melarutkan bekuan darah sehingga melancarkan laju aliran darah ke jantung dan otak. Cara ini biasanya cukup ampuh untuk mengatasi kasus CHD (*coronary heart disease*) akibat bekuan darah maupun stroke.
- Ekstraksi benda asing, yaitu suatu kegiatan memasukkan kateter ke dalam pembuluh darah untuk mengambil benda asing yang bersarang di dalam tubuh dan sulit dijangkau dari luar tubuh. Ekstraksi dilakukan dengan cara memasukkan kateter ke dalam pembuluh darah setelah sebelumnya dilakukan pencitraan terlebih dahulu untuk mengetahui secara pasti di mana posisi keberadaan benda asing tersebut.
- Tabung *gastrostomy*, yaitu kegiatan memasukkan tabung makan ke dalam perut. Kegiatan ini ditempuh jika pasien tidak mampu untuk mendapatkan suplai makanan melalui mulut.
- Kateter sisipan, yaitu kegiatan memasukkan kateter ke vena besar untuk memberikan obat kemoterapi, dukungan nutrisi, dan hemodialisis. Kateter juga bisa dimasukkan sebelum transplantasi sumsum tulang.
- Angioplasti arteri dan vena, yaitu kegiatan untuk mendeteksi penyumbatan atau penyempitan pembuluh darah, sekaligus melakukan pelebaran pembuluh darah yang menyempit atau tersumbat seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1. Prosedur ini dilakukan untuk meningkatkan aliran darah ke jantung. Prosedurnya mirip dengan prosedur yang sering dilakukan oleh ahli pembuluh darah dan jantung dalam mengintervensi penyakit jantung koroner, yaitu PTCA (*percutaneous transluminal coronary angioplasty*). Bedanya, angioplasti bisa dilakukan di pembuluh darah yang lain,

tidak hanya di pembuluh darah koroner, misal di arteri illiaca untuk mengatasi sumbatan pada arteri itu. Dalam banyak kasus, ahli IR dapat mengobati penyumbatan, seperti yang terjadi pada arteri di kaki atau ginjal, dengan memasukkan *stent* kecil yang bisa membuka dan mengembang. Prosedur ini disebut angioplasti balon. Pada angioplasti, penggunaan balon kecil di ujung kateter dimasukkan ke dalam pembuluh darah untuk membuka area penyumbatan. Tindakan ini biasanya dilakukan oleh dokter spesialis IR bekerja sama dengan dokter spesialis jantung dan pembuluh darah serta dibantu oleh beberapa asistennya.

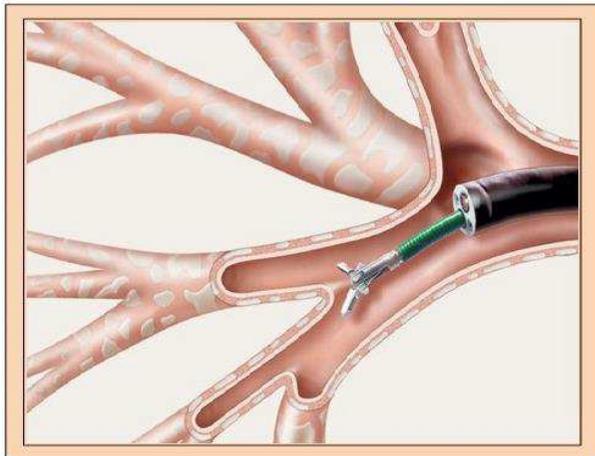


Gambar 5.1 Angiografi untuk deteksi penyempitan pembuluh darah [80]

- Arteriografi, yaitu kegiatan untuk pemeriksaan pembuluh darah otak, hati, koroner jantung, pembuluh balik (varises kaki). Pemeriksaan ini dapat diikuti dengan tindakan terapi seperti pemasangan *stent* untuk mengatasi stenosis pembuluh darah kecil. Juga dapat digunakan sebagai sarana pemberian kemoterapi atau materi radioaktif ke dalam lesi ganas dalam hati.
- Pengobatan kanker, yaitu kegiatan administrasi obat kanker secara langsung ke tempat tumor bersarang.

## 5.2. Pengambilan Sampel Jaringan

Biopsi mengandung pengertian yang sangat luas. Istilah ini meliputi semua tes pada jaringan yang bertujuan untuk mendeteksi kelainan, termasuk ukuran dan bentuk fisik sampel. Biopsi adalah prosedur medis berupa tindakan diagnostik yang dilakukan dengan cara pengambilan sampel kecil dari jaringan tubuh atau sel untuk keperluan analisis laboratorium baik untuk mendiagnosis suatu penyakit atau untuk mengetahui jenis pengobatan atau terapi yang terbaik bagi pasien [81]. Tindakan ini juga dikenal sebagai pengambilan sampel jaringan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2. Pemeriksaan jaringan tersebut bertujuan untuk mendeteksi adanya penyakit atau mencocokkan jaringan organ sebelum melakukan transplantasi organ. Dapat juga dilakukan untuk mengetahui perkembangan penyakit. Biopsi merupakan proses standar dalam tes genetik, di mana bahan kimia atau jenis agen lainnya dapat dimasukkan ke jaringan sebelum sampel jaringan diambil.



Gambar 5.2 Biopsi untuk pengambilan sampel jaringan dalam tubuh [82]

Ada banyak cara untuk melakukan biopsi, bergantung pada jenis jaringan yang dibutuhkan oleh dokter, penyakit yang diduga menyebabkan gangguan, atau hasil dari tes awal yang mendorong dokter untuk meminta agar biopsi dilakukan. Apabila biopsi dilakukan selama operasi, maka tindakan ini dikenal sebagai biopsi terbuka. Apabila biopsi cukup

dilakukan dengan membuat sayatan kecil, maka tindakan ini dikenal sebagai biopsi tertutup. Semakin besar sayatan yang dibutuhkan saat biopsi, maka semakin besar juga risiko yang dapat ditimbulkan. Dokter membutuhkan bius lokal atau total untuk mengurangi pendarahan dan nyeri, serta meningkatkan kenyamanan pasien [81]. Jaringan yang diambil untuk biopsi dapat berasal dari bagian tubuh mana pun, seperti kulit, perut, ginjal, hati, sumsum tulang dan paru. Beberapa tipe dari biopsi adalah [83]:

- Biopsi endoskopi, untuk pengambilan sampel jaringan menggunakan alat yang disebut endoskop.
- Biopsi jarum, untuk mengambil jaringan dari organ tubuh atau jaringan di bawah kulit.
- Biopsi eksisional, untuk mengambil bagian lebih besar dari jaringan.
- Biopsi kapsul, untuk mengambil sampel dari lapisan usus.
- Biopsi dengan alat untuk membuat lubang (*punch biopsy*), untuk mengetahui kondisi kulit.

Seorang dokter ahli penyakit dalam, baik spesialis kanker atau ahli ginjal, dapat meminta dan/atau melakukan biopsi. Kemudian, sampel yang diperoleh akan diuji di laboratorium, di mana ahli histologi yang memiliki keahlian khusus dalam struktur jaringan akan menganalisis sampel tersebut. Sementara itu, seorang ahli penyakit juga akan dibutuhkan untuk mencari tahu penyebab penyakit, walaupun hal ini dapat dilakukan juga oleh dokter yang meminta biopsi.

Setelah dilakukan pemeriksaan awal yang menunjukkan kelainan jaringan atau sel yang mencurigakan, seorang ahli penyakit dalam atau spesialis organ tubuh adalah orang yang paling tepat untuk memutuskan apakah pasien membutuhkan biopsi. Biopsi seringkali dikaitkan dengan kanker. Penyakit kanker dapat dideteksi dalam sel dan jaringan tubuh, di mana sel dapat menjadi tumor atau massa yang melekat pada organ tubuh [84]. Sebagai contoh, seorang wanita yang telah menjalani pemeriksaan mamografi dan menunjukkan adanya pertumbuhan tumor, kemungkinan akan diminta untuk melakukan biopsi payudara untuk lebih memastikan mengenai penyakit yang diderita atau untuk mencari penyebab pertumbuhan tumor. Tergantung pada jenis biopsi yang dilakukan,

tindakan ini dapat digunakan untuk mengetahui tingkat invasi penyakit, yaitu apakah penyakit telah menyebar ke bagian tubuh lainnya atau belum. Tindakan ini juga dapat digunakan untuk mengeliminasi keberadaan kanker atau mengetahui sifat tumor apakah jenis jinak atau ganas.

Biopsi juga dapat dilakukan untuk memeriksa keberadaan penyakit lain, seperti sirosis hati, yaitu suatu kondisi yang ditandai dengan hati yang terluka parah. Perubahan pada jaringan dapat dideteksi dengan biopsi. Sedangkan biopsi ginjal adalah prosedur standar untuk memeriksa apakah ginjal yang akan ditransplantasi membawa penyakit tertentu. Biopsi ginjal adalah prosedur standar untuk memastikan bahwa penerima ginjal akan mendapatkan ginjal yang sehat dan dapat berfungsi dengan baik.

Hasil biopsi biasanya akan diberikan setelah beberapa minggu. Namun, ada juga kasus di mana biopsi dilakukan saat operasi. Sampel jaringan dapat diambil sebelum atau saat operasi. Kemudian, sampel akan segera dikirim ke laboratorium, di mana dokter spesialis akan menganalisis sampel dan memberikan diagnosis atau laporan awal. Setelah itu, dokter bedah dapat menggunakan data tersebut untuk merencanakan operasi dengan baik. Biopsi yang lebih menyeluruh akan dilakukan beberapa hari atau beberapa minggu setelah operasi.

Biopsi seringkali dilakukan dengan menggunakan jarum. Ketebalan dan panjang jarum yang digunakan bergantung pada bagian tubuh yang akan diambil sampel jaringannya [84]. Sebagai contoh, dalam biopsi sumsum tulang, jarum yang panjang dibutuhkan untuk mengambil sampel. Biopsi juga dapat dilakukan dengan alat lain, seperti *probe* atau *scope* yang dapat digunakan untuk memandu dokter dalam mengambil sampel. Dalam *pap smear* digunakan sebuah alat untuk mengikis sampel jaringan dari rahim. Biopsi juga dapat bersifat invasif. Biopsi jenis ini membutuhkan waktu pemulihan yang lebih lama. Dokter perlu memberikan obat-obatan tertentu untuk mempercepat proses penyembuhan atau mencegah seoptimal mungkin risiko dan komplikasi yang mungkin timbul.

Dua risiko atau komplikasi biopsi yang paling umum adalah infeksi dan pendarahan. Biopsi biasanya akan menyebabkan sedikit pendarahan, terutama apabila dilakukan dengan membuat sayatan. Namun, setelah sayatan dijahit, pendarahan biasanya akan langsung berhenti. Bahaya yang

lebih besar adalah pendarahan serius, yang dapat terjadi apabila alat yang digunakan untuk mengambil sampel atau pemandu bagi alat pengambil sampel melukai atau merusak pembuluh darah. Infeksi dapat terjadi karena sayatan yang dibuat saat biopsi, namun dapat dicegah dengan pemberian obat-obatan.

Salah satu jenis biopsi adalah FNAB (*fine needle aspiration biopsy*) yang juga dikenal dengan nama biopsi aspirasi, yaitu biopsi menggunakan jarum halus [83]. Prosedur IR dipakai sebagai pemandu jalannya biopsi agar dokter dapat mengarahkan jarum tepat menuju sasaran yang akan diambil sampelnya. Kelebihan dari metode ini adalah pengerjaannya cepat, relatif tidak nyeri dan kurang menimbulkan perdarahan. Kekurangannya, metode ini bisa tidak representatif (tidak mewakili) pengambilan sampel jaringan pada tumor jenis tertentu. Untuk itu, pemeriksaan biopsi aspirasi mungkin bisa diikuti dengan biopsi terbuka untuk konfirmasi diagnosis.

Dalam kegiatan FNAB, jarum kecil dapat dimasukkan ke dalam area abnormal di hampir semua bagian tubuh dengan dipandu teknik pencitraan untuk memperoleh jaringan biopsi. Jenis biopsi ini dapat memberikan diagnosis tanpa intervensi bedah. Teknik FNBA menggunakan jarum yang sangat kecil sehingga bersifat *less invasive*. Bila dari hasil biopsi sudah diketahui jenis kanker dan penyebarannya, biasanya akan dilakukan tindakan pengobatan. Misal pada kanker payudara, jika ukuran kankernya terlalu besar akan dilakukan dulu kemoterapi supaya kankernya mengecil dan akarnya memendek. Tindakan ini disebut praoperasi atau *neoadjuvan*. Baru setelah itu bisa dilakukan pengangkatan area yang terkena kanker.

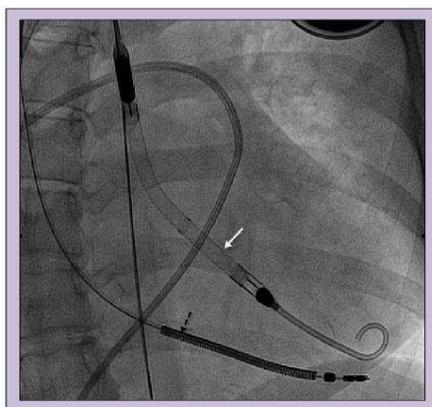
### **5.3. Fluoroskopi Intervensional**

Fluoroskopi, sebagaimana telah dibahas pada Bab 4, adalah cara pemeriksaan yang mengandalkan sifat tembus sinar-X dan penangkapan bayangan oleh suatu tabir yang bersifat luminisensi bila terkena paparan sinar tersebut. Pemeriksaan ini umumnya digunakan untuk studi visual (langsung) dari jatuhnya bayangan laten pada layar fluoroskopi [72]. Dalam aplikasi medik, fluoroskopi digunakan untuk memvisualkan gerakan dari struktur-struktur organ internal dalam tubuh. Radiolog maupun dokter spesialis radiologi dapat mengamati secara langsung gambaran struktur organ secara dinamik. Fluoroskopi diharapkan dapat

memberikan informasi kondisi pasien yang tidak bisa didapatkan oleh dokter melalui tes lain. Informasi ini digunakan untuk menentukan tindakan yang tepat dalam pengobatan atau untuk menentukan tindakan lebih lanjut yang diperlukan bagi pasien.

Dalam IR, aplikasi fluoroskopi sering dilakukan pada pemeriksaan angiografi maupun studi gastrointestinal [85]. Pada tindakan intervensional, fluoroskopi juga digunakan untuk memantau pergerakan dan posisi kateter yang dimasukkan ke dalam pembuluh darah menuju lokasi pengamatan secara langsung (*realtime*) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3. Fluoroskopi biasanya digunakan untuk mendiagnosis penyakit dalam bidang:

- Gastroenterologi, di sini fluoroskopi dilakukan untuk memantau bagian perut dan usus, biasanya menggunakan barium (dalam bentuk BaSO<sub>4</sub>) sebagai bahan kontras untuk menilai kondisi organ pencernaan dan melihat pergerakannya. Pemantauan itu mencakup kerongkongan, lambung, usus besar, dan usus kecil untuk menemukan penyebab gejala gangguan pencernaan, seperti muntah, kesulitan menelan, nyeri perut, atau gangguan pencernaan. Tindakan ini juga dapat digunakan untuk menemukan polip, tumor, atau untuk memastikan keberadaan sindrom kelainan penyerapan.
- Ortopedi, di sini fluoroskopi paling umum digunakan untuk mengamati proses penyembuhan dari tulang yang rusak untuk memastikan apakah tulang tersebut telah kembali ke posisi dan susunan yang benar selama proses penyembuhan. Fluoroskopi juga digunakan untuk membantu proses pemasangan implan pada jantung.
- Perawatan kardiovaskuler, di sini fluoroskopi biasanya dilakukan ketika diduga ada penyumbatan pembuluh darah. Tindakan ini digunakan untuk membantu proses pemasukan kateter dan mengamati pergerakannya dalam rangka mendiagnosis dan mengobati suatu penyakit jantung.



Gambar 5.3 Fluoroskopi intervensional untuk memandu pergerakan alat dalam tubuh [86]

Fluoroskopi adalah uji pencitraan rutin yang biasanya membutuhkan waktu antara 45 menit hingga satu jam. Durasi setiap fluoroskopi dapat beragam, bergantung pada bagian tubuh yang diperiksa. Proses fluoroskopi biasanya dimulai dengan pemberian zat kontras pembeding. Zat kontras bisa diberikan dengan jalan ditelan atau disuntikkan ke tubuh pasien. Fungsinya adalah untuk menggambarkan anatomi dan fungsi pembuluh darah dan sistem saluran pencernaan [48]. Ada dua jenis zat kontras yang saat ini banyak digunakan. Pertama adalah barium dalam bentuk  $BaSO_4$ , dapat diberikan melalui oral atau dubur untuk evaluasi sistem saluran pencernaan. Kedua adalah iodin (I), dapat diberikan melalui oral, rektal, rute intra arterial atau intravena.

Sifat dari zat kontras pada umumnya adalah kuat dalam menyerap atau menyebarkan sinar-X. Dalam hubungannya dengan pencitraan *real-time*, penggunaan zat kontras memungkinkan demonstrasi proses dinamis, seperti peristaltik di saluran pencernaan atau aliran darah dalam arteri dan vena. Iodin kontras mungkin juga terkonsentrasi di daerah abnormal lebih atau kurang dari pada jaringan normal sekitarnya dan membuat kelainan (tumor, kista, radang) tampak lebih mencolok. Selain itu, dalam keadaan tertentu, udara dapat digunakan sebagai agen kontras untuk sistem pencernaan dan karbon dioksida dapat digunakan sebagai agen kontras dalam sistem vena. Dalam kasus ini, kemampuan agen kontras dalam

melemahkan sinar-X lebih kecil dibandingkan dengan jaringan di sekitarnya, sehingga rongga yang berisi udara atau karbon dioksida akan tercitrakan dengan penampilan lebih terang dibanding daerah sekelilingnya.

Apabila fluoroskopi digunakan untuk pencitraan saluran pencernaan, proses ini dapat menyebabkan sedikit ketidaknyamanan karena pasien harus menelan zat kontras. Pada saat zat kontras tersebut mengalir melalui saluran pencernaan, dokter akan mendapatkan gambar yang jelas dari kerongkongan, perut, usus kecil, dan usus besar. Zat kontras pembeding juga dapat digunakan untuk pemeriksaan rektum, namun zat tersebut tidak ditelan oleh pasien, melainkan dimasukkan ke tubuh melalui tabung enema.

Ada dua jenis peralatan yang dapat digunakan dalam tindakan fluoroskopi, yaitu sistem tetap dan alternatif berjalan. Sistem tetap digunakan oleh laboratorium pencitraan yang alatnya terpasang di tempat itu secara permanen, sedangkan unit fluoroskopi C-arm berjalan memberikan fleksibilitas dalam lokasi pelaksanaan fluoroskopi [30]. Tindakan fluoroskopi pada dasarnya menggunakan sinar-X, yang menghasilkan gambar dari bagian dalam saat melewati tubuh dengan kecepatan maksimum 25-30 *frame* setiap detiknya, sehingga gambar video dari tubuh dapat dibuat. Hasil dari fluoroskopi akan diproses dengan peralatan khusus yang membantu memperjelas dan mencerahkan gambar sebelum gambar tersebut dipindahkan ke layar fluoresen. Model peralatan yang lebih baru dapat menghasilkan gambar digital.

Fluoroskopi memiliki risiko yang umumnya disebabkan oleh paparan radiasi pengion, dalam hal ini sinar-X [87]. Karena itu, tindakan ini tidak disarankan bagi wanita yang sedang hamil, karena fluoroskopi memiliki efek radiasi yang dapat membahayakan janin. Menurut peraturan, tindakan pencitraan ini hanya boleh dilakukan apabila manfaat yang diperoleh jauh lebih besar dibanding kemungkinan risikonya. Sebisa mungkin, ahli medis berupaya menggunakan radiasi dalam dosis rendah untuk mengurangi risiko paparan radiasi. Namun, dosis radiasi akan bergantung pada kondisi pasien dan jenis pemeriksaannya.

Dalam kasus di mana fluoroskopi digunakan untuk membantu tindakan yang membutuhkan waktu lama, misal dalam tindakan intervensi

yang melibatkan pemasangan cincin, ada kemungkinan pasien akan mendapatkan paparan radiasi dalam dosis yang relatif tinggi. Untuk mengurangi risiko paparan radiasi selama fluoroskopi, petugas medis harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut [87]:

- Selalu berusaha menekan serendah mungkin jumlah kumulatif paparan radiasi yang mengenai pasien.
- Ukuran luas medan paparan sinar-X harus diatur sedemikian rupa sehingga sinar-X hanya akan menyinari area target gambar dan tidak mengenai bagian tubuh lainnya.
- Penentuan posisi yang tepat pada saat penyinaran dengan sinar-X untuk menghindari pengulangan penyinaran.
- Melakukan filtrasi sinar-X terutama apabila tindakan perlu waktu lama.
- Penggunaan fitur *last-image hold* khusus untuk melihat gambar secara berulang tanpa harus terus melakukan penyinaran sinar-X berulang pada pasien.

Unit fluoroskopi biasanya memiliki perekam citra atau fluorografi. Perekaman citra tersebut dapat berupa citra digital yang menggunakan film diam (*spot film*) atau citra gerak (*sine*) [72]. Pemeriksaan dengan sistem *sine* fluorografi dikembangkan terutama untuk pemeriksaan pembuluh darah yang membutuhkan suatu dokumen berisi fungsi dinamik fisiologi seperti hati dan aliran darah. Umumnya kedua sistem tersebut memiliki kesamaan dalam komponen tabung sinar-X, tabung penguat citra, dan catu daya. Komponen yang tidak ditemukan dalam sistem fluoroskopi konvensional adalah kamera *sine*. *Sine* fluorografi digunakan untuk merekan pergerakan zat kontras yang dimasukkan ke pembuluh darah untuk mendiagnosis gejala penyakit yang diderita pasien, seperti informasi lokasi dan jumlah penyempitan pembuluh darah.

Pada pelaksanaan *sine* diperlukan beberapa kali rekaman citra berkualitas baik. Hal ini bisa diperoleh dengan memberi paparan radiasi yang besar kepada pasien. Laju paparan radiasi yang digunakan selama perekaman gambar dengan *sine* biasanya antara 10-20 kali lebih besar dibandingkan dengan fluoroskopi biasa. Sistem sinar-X yang menghasilkan tingkat paparan radiasi tinggi tersebut memerlukan generator sinar-X dengan kapasitas tenaga besar dan tabung dengan

kapasitas panas yang tinggi. Satu hal yang membedakan antara fluoroskopi konvensional dan *sine* adalah kapasitas penyimpanan panas yang lebih tinggi pada sistem *sine*.

Dalam fluoroskopi normal digunakan sinar-X intensitas rendah sehingga dosis yang diterima pasien pun relatif rendah. Sedang pada perekaman dengan *sine*, dibutuhkan paparan sinar-X dengan intensitas tinggi sehingga dosis radiasi yang diterima pasien pun menjadi relatif lebih besar. Karena itu, pemeriksaan *sine* memiliki potensi untuk meningkatkan paparan radiasi baik kepada pasien maupun pekerja yang melakukan tindakan. Faktor yang memberi kontribusi paparan radiasi tinggi pada pekerja adalah adanya kesulitan melindungi pekerja dari radiasi hamburan balik karena proyeksi sinar-X yang berubah-ubah.

#### **5.4. Kardiologi Intervensial**

Jantung merupakan suatu organ otot berongga yang terletak di pusat dada [88]. Bagian kanan dan kiri jantung masing-masing memiliki ruang sebelah atas (atrium) yang berfungsi mengumpulkan darah dan ruang sebelah bawah (ventrikel) yang berfungsi mengeluarkan darah. Agar darah hanya mengalir dalam satu arah, maka ventrikel memiliki satu katup pada jalan masuk dan satu katup pada jalan keluar. Sebagai salah satu organ tubuh yang sangat vital, jantung harus dijaga kondisinya agar tetap bisa melaksanakan tugas dan fungsinya dalam mendukung aktivitas kehidupan manusia.

Fungsi utama jantung adalah menyediakan oksigen ke seluruh tubuh dan membersihkan tubuh dari hasil metabolisme berupa karbondioksida. Jantung melaksanakan fungsi tersebut dengan mengumpulkan darah yang kekurangan oksigen dari seluruh tubuh dan memompanya ke dalam paru. Darah akan mengalir melalui pembuluh berukuran sangat kecil (kapiler) yang mengelilingi kantong udara di paru sambil menyerap oksigen dan melepaskan karbondioksida yang selanjutnya dihembuskan keluar tubuh melalui saluran pernafasan. Jantung selanjutnya mengumpulkan darah yang kaya oksigen dari paru dan memompanya menuju jaringan ke seluruh tubuh.

Dengan bekerjanya jantung, darah dapat dialirkan ke seluruh tubuh melalui pembuluh darah. Melalui mekanisme ini, seluruh jaringan tubuh

akan mendapatkan suplai oksigen. Kerja jantung melalui mekanisme berulang dan terus menerus ini juga dikenal sebagai siklus jantung, yang secara visual terlihat sebagai denyut jantung. Melalui mekanisme berselang, jantung berkontraksi untuk mengosongkan isi jantung dan bersantai untuk mengisi dengan darah [89]. Jantung dengan berat berkisar antara 200-425 gram dan ukurannya sedikit lebih besar dari kepalan tangan kanan, setiap harinya berdetak sebanyak kurang lebih 100.000 kali sambil memompa kurang lebih 7.571 liter darah. Jantung merupakan salah satu organ vital yang berperan penting terhadap kesetimbangan sistem hemodinamika tubuh manusia. Terganggunya fungsi jantung akan mengakibatkan terganggunya kesetimbangan sistem tersebut.

Sistem peredaran darah bermula dan berakhir di jantung. Keseluruhan sistem peredaran darah yang dikenal sebagai sistem kardiovaskuler itu terdiri atas arteri, arteriola, kapiler, vena dan vena. Arteri yang kuat dan lentur membawa darah dari jantung dan menanggung tekanan darah yang paling tinggi. Jika kerja jantung mengalami gangguan, maka peredaran darah dan suplai oksigen ke jaringan tubuh juga akan terganggu. Serangan jantung yang secara medis disebut *infark myocardial*, adalah kondisi di mana pasokan darah menuju ke jantung terhambat. Gangguan itu biasanya disebabkan oleh penggumpalan darah atau penumpukan lemak, kolesterol, dan unsur lainnya. Gangguan aliran darah ke jantung ini bisa merusak atau menghancurkan otot jantung yang bisa berakibat fatal. Jika pembuluh arteri menyempit, terjadilah hal-hal yang tidak diinginkan seperti sakit jantung, mulai dari nyeri dada, hingga serangan jantung yang berpotensi menyebabkan kematian mendadak.

Fakta menunjukkan bahwa penyakit jantung termasuk salah satu jenis penyakit yang telah merenggut banyak korban jiwa [90]. Penyebab utama terjadinya serangan jantung adalah penyakit jantung koroner. Penyakit ini terjadi karena tersumbatnya pembuluh darah utama yang memasok darah ke jantung (pembuluh koroner) karena timbunan kolesterol berupa plak. Plak yang retak akan mengakibatkan terjadinya penggumpalan darah. Akhirnya, penggumpalan darah menghambat pasokan darah dan oksigen ke jantung melalui pembuluh koroner. Kondisi inilah yang akhirnya menyebabkan terjadinya serangan jantung. Beberapa

faktor dapat meningkatkan risiko penyakit jantung koroner, antara lain: merokok, diabetes, kolesterol tinggi, tekanan darah tinggi, kebiasaan mengonsumsi makanan berlemak dan berat badan berlebih atau obesitas.

Serangan jantung yang parah atau terlambat ditangani bisa menyebabkan komplikasi yang serius dan bahkan berakibat pada kematian [91]. Pasien penderita serangan jantung yang disertai komplikasi sering kali meninggal dunia sebelum mereka sampai di rumah sakit. Komplikasi yang terjadi bisa muncul segera setelah terjadinya serangan jantung. Beberapa komplikasi yang bisa terjadi akibat serangan jantung adalah:

- **Gagal jantung**, yaitu kondisi di mana jantung tidak bisa lagi memompa darah ke tubuh secara efektif. Gagal jantung terjadi karena otot jantung mengalami kerusakan permanen akibat serangan jantung yang pernah terjadi.
- **Jantung rupture, yaitu** kondisi ketika otot, dinding, atau katup jantung sudah retak.
- **Aritmia**, yaitu kondisi ketika detak jantung menjadi tidak normal, jantung berdegup makin kencang hingga akhirnya berhenti berdetak dan terjadi henti jantung atau *cardiac arrest*.
- **Syok kardiogenik**, yaitu kondisi ketika otot jantung rusak parah dan tidak bisa lagi memasok darah ke tubuh dengan baik, sehingga menyebabkan fungsi tubuh tidak berjalan dengan baik.

Sekitar 33 persen orang yang mengalami serangan jantung akan meninggal. Kematian sering kali terjadi sebelum pasien mencapai rumah sakit, atau dalam satu bulan setelah pasien mengalami serangan jantung [90]. Apabila pasien berhasil bertahan hidup selama sebulan setelah serangan, kemungkinan besar mereka dapat bertahan hidup lebih baik. Seseorang bisa kembali pulih dari serangan jantung bergantung pada tingkat kerusakan otot jantung yang terjadi. Ada yang membutuhkan waktu pemulihan beberapa bulan dan ada pula yang butuh waktu hanya beberapa minggu. Waktu dari saat seseorang mengalami serangan jantung hingga dia mendapatkan pertolongan dapat memperbesar peluang hidup penderita. Makin cepat seseorang mendapatkan penanganan akibat serangan jantung, maka peluang hidupnya akan semakin besar, demikian pula sebaliknya.

Dengan penanganan yang tepat, penderita penyakit jantung sejatinya masih dapat melakukan berbagai aktivitas kehidupan normal tanpa harus muncul rasa kekhawatiran berlebihan. Agar kesehatan jantung tetap terjaga, maka setiap individu perlu melakukan pemeriksaan dan perawatan jantung lengkap secara rutin [91]. Apabila terjadi serangan jantung, pengobatan yang diberikan pada penderita adalah obat-obatan untuk melarutkan gumpalan darah dan prosedur operasi untuk mengembalikan aliran darah menuju jantung. Pengobatan yang dilakukan akan disesuaikan dengan tingkat keparahan kondisi yang dialami penderita.

Dalam kegiatan medis, pemeriksaan dan perawatan jantung bisa dilakukan melalui dua jalan, yaitu secara *non-invasive* (non-bedah) dan *invasive* (operasi bedah). Prosedur IR mempunyai peran penting dalam pemeriksaan dan perawatan jantung non-bedah. Angioplasti adalah prosedur non-bedah dan menjadi salah satu solusi tim medis untuk mengatasi jantung koroner akibat penyempitan pembuluh darah koroner [92]. Penyempitan itu sebagai akibat dari kerak atau plak yang mengendap di pembuluh darah arteri koroner. Pada angioplasti, balon yang belum dikembangkan di kirim ke pembuluh darah arteri yang menuju jantung. Setelah balon sampai tepat berada pada bagian pembuluh darah yang mengalami penyempitan, balon ditiup agar membesar dengan tujuan pembuluh darah ikut membesar, kemudian balon di tarik kembali. Bagian pembuluh darah yang telah di besarkan oleh balon tadi selanjutnya dipasang *stent* untuk mempertahankan posisinya sehingga aliran darah kembali lancar seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Radiologi intervensional dipakai untuk memandu pemasangan *stent* [93]

Pemeriksaan jantung secara non-bedah adalah pemeriksaan dan intervensi untuk mendiagnosis sekaligus pengobatan dengan memasukkan sesuatu ke dalam tubuh pasien. Pemeriksaan jantung atau diagnostik jantung non-bedah ini dapat dilakukan melalui beberapa cara [92]. Kateterisasi jantung (angiografi koroner) adalah pemeriksaan diagnostik dengan cara memasukkan kateter yang dibuat dari bahan plastik khusus berdiameter  $\pm 2\text{mm}$ , yang didesain khusus untuk pemeriksaan jantung dan pembuluh darah. Pemeriksaan ini dilakukan melalui suatu sayatan kecil di kulit daerah lipatan paha atau lengan, dengan bius lokal, lalu kateter dimasukkan melalui jalur pembuluh darah sampai ke dalam pembuluh darah koroner jantung.

Dengan bantuan zat kontras yang disuntikkan dapat diketahui adanya kelainan anatomi jantung, penyempitan atau sumbatan dari pembuluh koroner, gangguan fungsi pompa jantung, dan sebagainya. Pemeriksaan ini juga merupakan hal terpenting untuk deteksi penyakit jantung koroner serta untuk tindakan lebih lanjut seperti balonisasi koroner baik dengan maupun tanpa stent, atau operasi bedah pintas koroner. Pemeriksaan ini juga dapat digunakan untuk mendeteksi penyakit katub jantung dan kelainan jantung bawaan. Seluruh tahap kegiatannya dipandu dengan prosedur IR berupa fluoroskopi intervensional.

Karena kondisi pasien, seringkali perawatan jantung harus dilakukan melalui jalan operasi bedah. Kegiatan itu meliputi [94]:

- Pemasangan pacu jantung sementara maupun permanen. Tindakan ini dilakukan apabila terjadi gangguan atau blok pada sistem listrik jantung yang diketahui melalui pemeriksaan elektrokardiografi (EKG), di mana frekuensi denyut jantung menjadi sangat lambat sehingga menimbulkan keluhan atau dapat menimbulkan bahaya pada pasien tersebut. Pacu jantung sementara dapat dilepas setelah irama jantung menjadi normal. Namun jika tidak ada perubahan, maka tindakan selanjutnya adalah dengan memasang pacu jantung permanen.
- Operasi bedah pintas koroner (CABG) atau ganti katup jantung. Kegiatan ini sering juga disebut dengan operasi bedah jantung. Operasi ini dilakukan apabila terdapat penyempitan pembuluh darah koroner yang cukup berat sehingga tidak ideal

untuk dilakukan balonisasi koroner. Pada operasi ini pembuluh darah yang menyempit atau tersumbat diberi aliran pengganti yang diambil dari pembuluh darah kaki, bisa juga pembuluh darah dada atau lengan, yang disambungkan langsung dari aorta (arteri besar) dialirkan melampaui (*mem-by pass*) penyempitan arteri koroner, sehingga aliran koroner menjadi lancar kembali. Sedangkan operasi ganti katup jantung dilakukan apabila terdapat penyempitan atau kebocoran berat pada katup kanan atau kiri sehingga tidak bisa lagi diatasi dengan obat-obatan dan sulit diatasi dengan tindakan lain.

### **5.5. Angiografi**

Angiografi adalah alat berbasis sinar-X untuk memeriksa pembuluh darah dalam tubuh termasuk jantung, otak, dan ginjal dengan bantuan zat kontras. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah pembuluh darah itu terkena penyakit, menyempit, membesar atau tertutup sesuatu. Kegunaannya adalah untuk mendeteksi adanya penyumbatan atau penyempitan di dalam pembuluh darah [95]. Pemeriksaan ini dianjurkan untuk dilakukan pada perokok berat, orang dengan berat badan berlebihan (obesitas), orang dengan keluhan nyeri dada hebat, dan orang dengan penyakit jantung koroner. Kateter angiografi adalah plastik panjang seukuran sedotan kecil. Kegunaannya adalah untuk:

- Mendeteksi adanya penyumbatan atau penyempitan di dalam pembuluh darah.
- Mengidentifikasi kelainan dalam pembuluh darah.
- Mendeteksi penyebab stroke.
- Mendeteksi kelainan pembuluh darah otak.

Arteri koroner adalah pembuluh darah yang berfungsi untuk menyuplai darah ke otot jantung. Penyempitan pada arteri koroner yang sering disebut *atherosclerosis* ini disebabkan oleh penimbunan kolesterol dan zat atau substansi lain pada dinding arteri. Proses penyempitan yang terus berlangsung menyebabkan suplai darah ke otot jantung menjadi berkurang. Kondisi ini biasanya dapat menyebabkan nyeri dada yang biasa disebut *angina pectoris*. Gangguan ini biasanya dirasakan pada saat melakukan aktivitas atau sedang stres, dapat pula terjadi gejala sesak

nafas, denyut jantung tidak teratur dan mudah lelah. Pada saat pembuluh darah tiba-tiba tersumbat total, terjadilah peristiwa yang disebut serangan jantung mendadak. Serangan jantung (*infark myocardial*) adalah suatu keadaan di mana secara tiba-tiba terjadi pembatasan atau pemutusan aliran darah ke jantung sehingga otot jantung (*myocardium*) mati karena kekurangan oksigen.

Penyakit jantung yang paling sering dijumpai di Amerika Serikat adalah penyakit jenis *atherosclerosis coronar*. Kondisi patologis arteri koroner ini ditandai dengan penimbunan abnormal lipid atau bahan lemak dan jaringan fibrosa di dinding pembuluh darah yang mengakibatkan perubahan struktur dan fungsi arteri dan penurunan aliran darah ke jantung [91]. Penyakit *atherosclerosis* disebabkan oleh kelainan metabolisme lipid, koagulasi darah dan keadaan biofisika serta biokimia dinding arteri. Pembuluh darah jantung dikenal sebagai arterokoronari. Pembentukan bahan berlemak atau plak dari kolesterol dapat menyempitkan pembuluh darah jantung sehingga mengurangi jumlah suplai oksigen ke jantung yang memicu kematian.

Penyakit jantung koroner adalah suatu jenis penyakit yang terjadi pada bagian arteri koroner. Sedang arteri koroner sendiri merupakan pembuluh darah yang menyuplai jantung dengan darah agar dapat terus bekerja [91]. Arteri koroner terletak di luar jantung dan muaranya keluar dari aorta. *Coronary angiography* merupakan satu-satunya metode akurat untuk mendeteksi adanya penyakit jantung koroner dan mampu memperlihatkan bagian-bagian pembuluh darah koroner yang mengalami penyempitan atau penyumbatan oleh plak *atherosclerosis*. Plak ini terbentuk secara perlahan dalam jangka waktu bertahun-tahun pada lapisan dinding pembuluh dan terus tumbuh dalam lumen pembuluh, bukan merupakan suatu endapan atau timbunan yang menempel pada dinding pembuluh.

Bila plak sudah membesar, maka lumen arteri akan menyempit dan aliran darah ke otot jantung menjadi berkurang. Peristiwa ini akan menjurus ke sakit dada (*angina pectoris*) atau serangan jantung (*heart attack*). *Angina pectoris* biasanya timbul jika jantung harus bekerja lebih keras dari normal, seperti selama latihan fisik atau saat emosi. Bagian jantung yang disuplai oleh arteri yang menyempit akhirnya tidak

mendapatkan suplai oksigen yang mencukupi sehingga muncullah sakit dada. Pada serangan jantung, arteri yang menyempit tiba-tiba menjadi tersumbat total karena terbentuknya bekuan darah di bagian arteri yang mengalami penyempitan. Bagian otot jantung yang disuplai oleh arteri tersebut tidak mendapatkan oksigen sama sekali sehingga dapat mengalami kerusakan secara permanen jika aliran darah tidak segera diperbaiki. Untuk mengobati *angina pectoris* dan mencegah serangan jantung, diperlukan adanya pemeriksaan pada pembuluh darah koroner yang mengalami penyempitan, serta mendeteksi seberapa parah penyempitannya, sehingga dokter dapat memutuskan untuk memberikan pengobatan terbaik kepada pasien.

Angiografi pada prinsipnya sama seperti pemanfaatan pesawat sinar-X pada umumnya. Alat itu mempunyai lengan berbentuk seperti huruf C sehingga sering dikenal dengan sebutan *C-arm* [96]. Pada bagian di bawah gantri tempat pasien berbaring ada tabung sinar-X. Di atas pasien ada layar detektor penangkap yang menerima sinyal sinar-X setelah melewati pasien. Sinyal-sinyal listrik dari detektor selanjutnya diolah sehingga menghasilkan gambar citra yang dapat ditampilkan pada layar monitor dalam bentuk video. Sinar-X menembus tubuh pasien dan diserap dalam tingkatan berbeda-beda oleh tiap-tiap bagian jaringan, sehingga tiap jaringan itu menampilkan citra hasil bayangan yang berbeda-beda tingkat kontrasannya. Bahan kontras disuntikkan ke dalam kateter untuk menjaga ketajaman gambar pembuluh darah. Gambar hasil pencitraan dengan sinar-X itu selanjutnya dapat disimpan dalam komputer atau plat film. Dengan demikian, hasil pencitraannya dapat dilihat seperti film dan videonya dapat diputar ulang sesuai kebutuhan. Keseluruhan prosedur pemeriksaan angiografi memakan waktu sekitar 30 menit.

*Coronary angiography* adalah suatu prosedur sinar-X untuk memeriksa pembuluh darah arteri jantung (*coronary artery*) dengan kamera khusus untuk melihat apakah pembuluh darah itu mengalami penyempitan atau penyumbatan. Prosedur ini memiliki arti penting bila dokter menduga atau mengetahui pasiennya menderita penyakit jantung koroner. Dengan cukup melakukan pembiusan lokal, dokter akan memasukkan sebuah selang plastik panjang berukuran kecil ke dalam sebuah pembuluh darah arteri yang terdapat di lipat paha atau tangan.

Selang kecil yang tipis dan fleksibel itu disebut kateter. Prosedur ini sering juga dikenal sebagai kateterisasi jantung. Setelah kateter berhasil masuk ke dalam tubuh, dokter akan mendorongnya hingga sampai ke pembuluh darah utama yang keluar dari jantung (aorta), yang merupakan tempat muara dari arteri koroner.

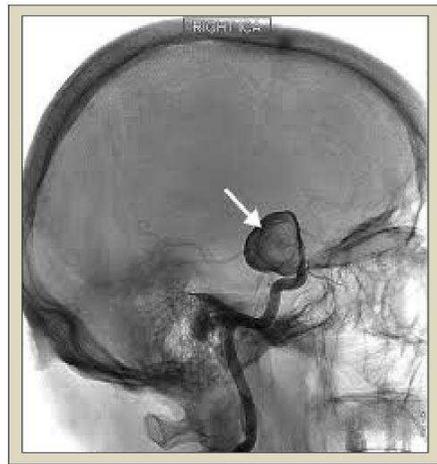
Agar dapat melihat arteri koroner dengan jelas dan tajam, langkah selanjutnya yang dilakukan dokter adalah menginjeksikan bahan kontras ke dalam arteri koroner yang prosesnya dicitrakan dengan fluoresensi sinar-X. Melalui proses itu dokter dapat melihat permasalahan apa yang terjadi pada arteri koroner. Cairan kontras itu akan mengalir mengikuti aliran darah sehingga dapat diketahui jika ada saluran atau pembuluh darah di jantung yang menyempit atau tersumbat.

Media Kontras yang sangat menyerap radiasi sinar-X, dalam hubungannya dengan kemampuan pencitraan *real-time fluroscopy* dan angiografi membantu menunjukkan proses dinamis, seperti gerakan peristaltik pada saluran pencernaan atau aliran darah. Peristaltik adalah serangkaian relaksasi dan kontraksi otot yang terjadi pada lapisan usus saluran pencernaan, umumnya terjadi pada usus besar. Proses peristaltik ini memungkinkan produk makanan dan limbah didorong melalui usus. Kontraksi ini juga sangat umum terjadi pada organ yang menghubungkan ginjal ke kandung kemih.

Selain pada jantung, angiografi juga sering dilakukan pada pemeriksaan otak. Tes yang disebut oleh dokter *angiography cerebral* ini meliputi penyinaran sinar-X pada pembuluh darah otak setelah injeksi cairan kontras khusus pada arteri di leher, paha dalam, atau area lainnya [97]. Cairan kontras ini akan tampak pada saat penyinaran ketika mencapai otak dan disirkulasikan melalui pembuluh darah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5. Biasanya *angiography cerebral* dilakukan jika dokter menduga ada kelainan pada pembuluh darah otak. Pada awalnya kelainan ini didukung dengan hasil pemeriksaan *scanning* tomografi terkomputer (CAT *scan*) pada otak atau fungsi spinal. Angiografi dilakukan karena beberapa alasan sebagai berikut:

- Untuk mendeteksi problem pada pembuluh darah yang ada di dalam atau yang menuju otak seperti aneurisme, malformasi pembuluh darah, trombosis, penyempitan atau penyumbatan.

- Untuk mempelajari pembuluh darah otak yang letaknya tidak normal karena tumor, gumpalan darah, pembengkakan, spasme, tekanan otak meningkat, atau hidrosefalus.
- Untuk menentukan pemasangan penjepit pembuluh darah pada saat pembedahan dan untuk mengecek kondisi pembuluh tersebut.

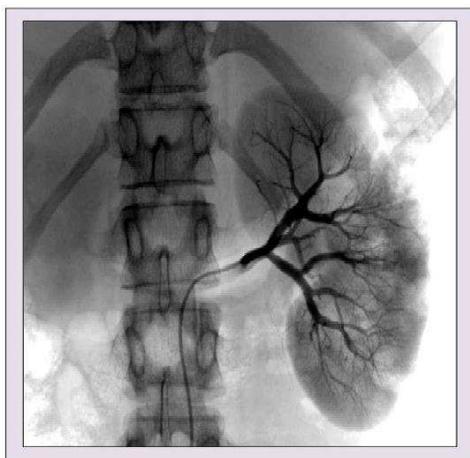


Gambar 5.5 Angiografi untuk mencitrakan sistem aliran darah bagian otak [98]

Perubahan di dalam pembuluh darah otak mendukung adanya kelainan, seperti spasme, plak, fistula, malformasi arteriovenus, atau arteriosklerosis. Penurunan darah ke otak mungkin berhubungan dengan tekanan dalam otak yang meningkat. Jika ada pembuluh darah otak yang letaknya tidak lazim, maka perubahan ini menunjukkan adanya tumor, daerah pembengkakan, atau penyumbatan aliran cairan spinal [99]. Jika terdapat tumor, tes dapat menunjukkan pembuluh darah yang ada dalam tumor, sehingga dokter dapat mengetahui letak dan asal tumor tersebut.

Angiografi ginjal merupakan pemeriksaan angiografi yang digunakan untuk mengevaluasi aliran darah pada ginjal seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6. Pemeriksaan ini biasanya digunakan untuk mendeteksi kelainan pada pembuluh darah ginjal, seperti: aneurisme, penyempitan pembuluh darah (stenosis atau vasospasme), malformasi arteriovena (kelainan sambungan antara arteri dan vena), trombosis (bekuan darah di dalam pembuluh darah) atau sumbatan, dan hipertensi renovaskular

(tekanan darah tinggi akibat penyempitan arteri ginjal). Angiografi ginjal juga bisa dilakukan untuk mendeteksi kondisi lain seperti tumor, pendarahan, komplikasi cangkok ginjal, dan invasi tumor ke pembuluh darah [95]. Bisa juga dipakai untuk melihat konfigurasi pembuluh darah ginjal sebelum pembedahan, menunjukkan adanya penyakit ginjal atau gagal ginjal, dan memeriksa donor dan penerima cangkok ginjal untuk menentukan jumlah pembuluh darah arteri dan vena pada setiap ginjal.



Gambar 5.6 Angiografi ginjal untuk mendeteksi kelainan pembuluh darah ginjal [100]

Penyumbatan pembuluh darah ginjal dapat menyebabkan tekanan darah tinggi dan fungsi ginjal yang abnormal [95]. Angiografi ginjal perlu dilakukan untuk pasien dengan tekanan darah tinggi pada usia yang sangat muda. Pemeriksaan serupa juga dilakukan pada pasien dengan kerusakan fungsi ginjal yang diduga disebabkan oleh penyumbatan arteri pemasok darah ke ginjal. Zat kontras disuntikkan melalui kateter yang ditempatkan di dalam pembuluh darah ginjal untuk mendeteksi tanda-tanda penyumbatan, penyempitan, atau kelainan lain yang memengaruhi suplai darah ke ginjal. Penyebaran zat kontras melalui pembuluh darah diamati dengan fluoroskopi sinar-X. Jika penyempitan ditemukan, pasien selanjutnya akan menjalani angioplasti, yaitu perbaikan atau pelebaran arteri melalui peniupan balon.

Angiografi pulmonal merupakan pemeriksaan angiografi yang digunakan untuk mengevaluasi aliran darah pada paru [101]. Pemeriksaan ini dilakukan untuk berbagai keperluan, seperti mendeteksi adanya emboli paru, yaitu sumbatan pada pembuluh darah arteri yang menyebabkan aliran darah ke paru tiba-tiba berkurang. Emboli paru ini bisa disebabkan oleh bekuan darah, partikel lemak, udara atau tumor. Pemeriksaan ini bisa juga dipakai untuk mendiagnosis adanya malformasi arteri-vena pada paru, mendeteksi adanya kelainan kongenital pada pembuluh darah paru, mendeteksi adanya penyempitan pada pembuluh darah paru, mendeteksi adanya aneurisme pembuluh darah arteri di paru, serta mengukur tekanan di dalam pembuluh darah arteri untuk mengetahui adanya hipertensi pulmoner, di mana tekanan darah di dalam pembuluh darah arteri paru tinggi.

# 6



## ONKOLOGI RADIASI

Kedokteran merupakan salah satu bidang yang paling banyak mengambil manfaat dari penemuan sinar-X. Penemuan Sinar itu ternyata mampu mengantarkan ke arah terjadinya perubahan mendasar dalam bidang kedokteran. Karena daya tembus sinar-X diketahui demikian tinggi, maka manusia segera merintis jalan memanfaatkan sinar tersebut untuk keperluan radiodiagnosa. Struktur anatomi dan fisiologi tubuh manusia yang semula merupakan objek yang tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata, ternyata dapat diubah menjadi objek yang transparan oleh sinar-X. Dengan penemuan sinar-X itu maka informasi mengenai kondisi di dalam tubuh manusia menjadi mudah diperoleh tanpa perlu melakukan operasi bedah.

Perkembangan berikutnya membuktikan bahwa sinar-X bukan hanya bermanfaat untuk mendiagnosis penyakit yang kini populer dengan sebutan pencitraan diagnosis, tetapi radiasi itu ternyata dapat juga dimanfaatkan sebagai sarana pengobatan penyakit kanker yang kegiatannya lebih populer dengan sebutan onkologi radiasi [44]. Tidak lama setelah penemuan sinar X, para ilmuwan mengetahui bahwa sinar tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada jaringan tubuh manusia. Karena itu mulailah dirintis kegiatan radioterapi dengan tujuan untuk pengobatan kanker menggunakan sinar-X.

Pada mulanya, kegiatan radioterapi dilakukan tanpa dasar pengetahuan patologi onkologi serta radiobiologi. Perhitungan mengenai dosis radiasi yang diberikan untuk pengobatan kanker juga belum menjadi perhatian. Pada masa awal kemunculan onkologi radiasi juga belum diketahui jenis kanker apa saja yang dapat diatasi dan jenis apa yang tidak dapat diatasi dengan pengobatan sinar-X. Umumnya dokter memberikan paparan radiasi dalam jangka waktu panjang setiap kali pengobatan.

Sebagai langkah rintisan dalam onkologi radiasi, yaitu pengobatan tumor ganas menggunakan sinar pengion, pada sebagian besar pasien terjadi kematian jaringan kanker, namun tidak lama kemudian timbul anak sebar di kelenjar getah bening regional atau bahkan di tempat jauh dari posisi kanker semula yang diobati [44]. Selain itu, jaringan sehat bagian tubuh lain juga mengalami kerusakan yang cukup parah sehingga tidak jarang kegiatan radioterapi itu justru mengakibatkan kematian pasien.

Mengingat kegiatan radioterapi itu ternyata lebih banyak mendatangkan kerugian dibandingkan dengan keuntungan yang didapat, maka secara perlahan pengobatan kanker dengan radiasi mulai ditinggalkan oleh para dokter. Namun di sisi lain, penelitian terus berlangsung hingga akhirnya diperoleh berbagai informasi baru dengan diketahuinya berbagai macam fakta yang menjadi dasar-dasar onkologi radiasi modern saat ini. Seiring dengan perkembangan informasi baru itulah onkologi radiasi juga berkembang dan kembali dimanfaatkan untuk penanganan kanker [44].

### **6.1. Penanganan Kanker**

Kanker adalah istilah umum yang digunakan untuk menamai penyakit di mana sel-sel abnormal membelah tanpa kontrol dan mampu menyerang jaringan lain. Sel-sel kanker dapat menyebar ke bagian lain dari tubuh melalui darah dan sistem limfa [70]. Penyakit ini bukan hanya merujuk kepada satu jenis penyakit saja, tetapi mencakup banyak penyakit yang jumlahnya mencapai lebih dari 100 jenis kanker. Sebagian besar kanker diberi nama untuk organ atau jenis sel di mana mereka mulai tumbuh dan berkembang, misal kanker yang dimulai di usus besar disebut kanker usus besar, kanker yang berawal di sel-sel basal kulit disebut karsinoma sel basal, dan sebagainya.

Di dunia medis, jenis kanker umumnya dikelompokkan ke dalam katagori yang lebih luas. Karsinoma adalah kanker yang dimulai di kulit atau pada jaringan yang mencakup garis atau organ internal. Sarkoma adalah kanker yang dimulai di tulang, tulang rawan, lemak, otot, pembuluh darah, atau lainnya atau mendukung jaringan penghubung. Ada juga leukemia, yaitu kanker yang dimulai di jaringan pembentuk darah seperti sumsum tulang dan menyebabkan sejumlah besar sel darah abnormal diproduksi dan masuk ke dalam darah. Katagori lainnya adalah limfoma dan mieloma untuk kanker yang dimulai di sel-sel sistem kekebalan tubuh. Sedang kanker sistem saraf pusat adalah kategori kanker yang dimulai di jaringan otak dan sumsum tulang belakang.

Karena merupakan suatu bentuk partumbuhan jaringan tubuh yang tidak normal, maka kanker merupakan parasit bagi manusia penderitanya [70]. Penyakit ini dapat menyerang berbagai jaringan organ tubuh manusia seperti otak, hati, payudara, tulang, rahim, kulit, darah dan sebagainya, tanpa mengenal usia penderita. Pada Gambar 6.1 disajikan gambar pertumbuhan sel kanker yang menyerang organ mata. Kematian tahunan akibat kanker menunjukkan peningkatan dari waktu ke waktu. Di Jepang misalnya, kematian akibat kanker menempati urutan tertinggi sejak 1979. Jumlah kematian akibat kanker mencapai 223.604 kasus pada 1991, sedang jumlah pasien kanker baru mencapai 500.000 orang pada 2000 [102].



Gambar 6.1 Sel kanker yang tumbuh dan menyerang organ mata [103]

Pada akhir 2013, Badan Kesehatan Dunia (WHO) memaparkan data jumlah penderita kanker di seluruh dunia mencapai 14 juta orang [104]. Jumlahnya diperkirakan akan terus meningkat hingga pada 2025 mencapai 19 juta orang. Badan Kesehatan Dunia menyatakan bahwa naiknya jumlah penderita kanker itu disebabkan oleh perubahan gaya hidup orang-orang di negara berkembang. Jumlah perokok dunia naik, demikian juga dengan orang-orang yang mengalami kelebihan berat badan. Dari 14 juta penderita kanker di seluruh dunia, 1,8 juta di antaranya (atau sekitar 13 persen) adalah kanker paru-paru yang umumnya disebabkan oleh kebiasaan merokok. Badan itu juga mengumumkan terjadinya kenaikan tajam penderita kanker payudara, yang sekarang diketahui sebagai jenis kanker paling banyak ditemui di kalangan perempuan di 140 negara. Kanker payudara juga menjadi penyebab utama kematian akibat kanker di negara-negara berkembang. Perkembangan sel kanker mengikuti pola tertentu dengan jangka waktu cukup lama sehingga biasanya tidak disadari oleh calon penderitanya.

Kanker merupakan penyakit tidak menular yang menjadi masalah kesehatan masyarakat di dunia. Pemicu kanker merupakan gabungan dari sekelompok faktor, meliputi genetik dan lingkungan [70]. Karena itu, kalangan medis tidak bisa tahu secara pasti penyebab timbulnya penyakit kanker yang diderita seseorang. Namun kini diketahui ada beberapa faktor yang diduga meningkatkan risiko kanker. Faktor keturunan memiliki andil terhadap munculnya kanker jenis tertentu. Faktor genetik menyebabkan beberapa keluarga memiliki risiko lebih tinggi menderita kanker tertentu dibandingkan keluarga lainnya, misal pada kasus kanker rahim dan payudara. Faktor lingkungan pun bisa berperan memicu kanker pada seseorang. Merokok meningkatkan risiko terjadinya kanker paru, mulut, laring (pita suara), dan kandung kemih. Faktor lingkungan lainnya, yaitu sinar ultra violet dari matahari serta radiasi pengion berupa sinar kosmis dari ruang angkasa juga bisa memicu kanker kulit. Masih ada faktor-faktor lain seperti keberadaan radikal bebas yang bertebaran di lingkungan hidup.

Pemicu lainnya adalah bahan kimia tertentu. Makanan yang terkontaminasi bahan kimia dapat menjadi faktor risiko penting lain penyebab kanker, terutama kanker pada saluran pencernaan. Virus juga punya andil terhadap munculnya serangan kanker. Virus yang dicurigai

dapat menyebabkan kanker antara lain: virus Papilloma, virus Sitomegalo, virus Hepatitis B dan sebagainya. Infeksi akibat serangan parasit *Schistosoma* dapat menyebabkan kanker kandung kemih. Perilaku yang mencirikan gaya hidup seseorang juga bisa berperan sebagai pemicu kanker, seperti kebiasaan merokok, mengkonsumsi makanan yang banyak mengandung lemak dan daging yang diawetkan, serta minuman beralkohol.

Kanker masih menjadi penyakit paling mematikan di berbagai belahan dunia [102]. Salah satu penyebabnya adalah sebagian besar pasien terlambat berobat, sehingga penanganan yang dilakukan tak bisa maksimal. Berdasarkan pengalaman, hanya 20-30 persen pasien kanker yang berobat ketika masih stadium awal. Sisanya 70-80 persen berobat ketika kanker sudah masuk stadium lanjut, yaitu stadium tiga ke atas. Pada kondisi ini angka harapan hidup pasien sudah berada di bawah 40 persen.

Onkologi adalah spesialisasi medis yang berkenaan dengan studi dan praktik pengobatan kanker atau tumor [44]. Dokter yang mendalami onkologi disebut onkologi. Ahli onkologi atau sering disebut spesialis kanker memiliki kompetensi dalam diagnosis dan terapi kanker. Seperti halnya bidang kedokteran lain, seorang spesialis onkologi berperan dalam diagnostik, terapi, dan perawatan paliatif pasien kanker. Terapi paliatif biasanya diberikan pada pasien kanker stadium lanjut. Terapi ini memang tidak memfokuskan kegiatan pada bagaimana cara menyembuhkan pasien, namun lebih kepada bagaimana pasien dapat melakukan aktivitas tanpa terganggu rasa sakit, sehingga tetap menikmati dalam menjalani aktivitas hidupnya. Onkologi merupakan disiplin yang sangat penting dalam bidang perawatan kanker. Usai pengobatan, ahli onkologi bertanggungjawab untuk mendeteksi kemungkinan kambuh atau pengulangan kanker. Onkologi juga bertanggungjawab pada perawatan paliatif atau gejala keganasan terminal.

Spesialis onkologi bertanggungjawab merencanakan terapi yang paling cocok pada pasien kanker. Selama ini ada tiga pendekatan yang sering ditempuh dalam terapi kanker, yaitu operasi bedah, kemoterapi dan radioterapi. Dalam praktiknya, tidak jarang suatu penyakit kanker harus ditangani dengan melibatkan gabungan beberapa jenis metode terapi. Karena itu, ada tiga klasifikasi kegiatan onkologi, yaitu [44]:

- Onkologi bedah yang berkaitan dengan proses pengobatan dan penyembuhan kanker melalui operasi pembedahan.
- Onkologi medis yang berkaitan dengan proses pengobatan dan penyembuhan kanker dengan kemoterapi.
- Onkologi radiasi yang berkaitan dengan proses pengobatan dan penyembuhan kanker menggunakan radiasi, dengan teknik pengobatannya sering disebut radioterapi.

Masing-masing metode untuk penanganan penyakit kanker tadi memiliki kelebihan, keterbatasan dan kekurangan. Tatalaksana kanker merupakan tatalaksana yang bersifat multimodalitas (kombinasi beberapa jenis terapi) dan multidisiplin (melibatkan berbagai spesialisasi), dengan modalitas utamanya adalah operasi, radioterapi, dan kemoterapi. Kerja sama multidisiplin mutlak diperlukan dan saling mendukung. Operasi bedah merupakan pilihan efektif untuk tipe kanker yang tidak terikat erat pada jaringan tubuh lainnya, serta sel-sel kankernya terbungkus dalam satu kesatuan. Namun teknik pembedahan ini menjadi kurang menguntungkan pada jenis kanker terbuka, karena dapat meninggalkan sisa-sisa sel kanker yang dapat tumbuh kembali di kemudian hari. Teknik operasi bedah juga tidak dapat digunakan untuk jenis kanker yang sudah bermetastasis, yaitu telah menyebar ke organ atau jaringan lain.

Metode kemoterapi dilakukan dengan cara memberikan obat dalam bentuk senyawa kimia untuk membunuh sel-sel kanker dalam tubuh pasien. Metode ini cukup dapat diandalkan untuk terapi anak sebar kanker, misal kanker payudara yang sudah menyebar ke paru-paru. Dalam kasus seperti ini, perlakuan kemoterapi merupakan satu-satunya pilihan, di mana obat dapat diberikan melalui suntikan atau dimakan sehingga masuk aliran darah dan mengejar sel-sel kanker. Namun teknik kemoterapi di samping membunuh sel-sel kanker juga dapat mengakibatkan rusaknya sel-sel normal yang kebetulan menyerap obat tersebut.

Teknik kemoterapi berpengaruh pada jaringan dengan pertumbuhan cepat seperti membran mukosa, sel rambut, sumsum tulang dan organ reproduksi. Karena itu, efek samping yang dialami pasien biasanya berupa mual dan muntah, penurunan jumlah sel darah merah, penurunan jumlah sel darah putih, penurunan jumlah trombosit, dan kerontokan semua jenis rambut, termasuk alis dan bulu mata, setelah 2 hingga 3 minggu

pengobatan. Rambut baru akan tumbuh kembali setelah 4 hingga 8 minggu pasca pengobatan.

Pendekatan dengan teknik radioterapi dapat dilakukan dengan cara yang lebih sederhana, yaitu penyinaran menggunakan sumber radiasi baik dalam bentuk sinar-X, sinar gamma maupun jenis radiasi lainnya. Penyinaran dilakukan secara berkala dalam waktu yang relatif lama. Radioterapi merupakan suatu metode yang sangat efektif dan sudah mapan untuk perlakuan terapi maligna. Salah satu kendala terapi kanker dengan radiasi ini adalah rusaknya jaringan sel-sel normal di sekitar kanker tersebut yang kebetulan terpapar radiasi. Di samping itu, fasilitas untuk pelaksanaan radioterapi relatif jauh lebih mahal dibandingkan kedua metode sebelumnya. Pengobatan dengan radiasi dapat diberikan secara mandiri (tanpa dikombinasi dengan pengobatan lain) atau dapat juga dilakukan secara kombinasi, baik dengan pembedahan maupun kemoterapi. Radioterapi dapat diberikan pada semua jenis kanker dan stadium [44].

Efek samping terapi kanker dengan teknik radioterapi hampir sama dengan pemberian perawatan kanker dengan cara lainnya [105]. Pada dasarnya tujuan utama pengobatan terhadap penyakit kanker adalah menghambat pertumbuhan dan membunuh sel kanker itu sendiri. Namun pada kenyataannya, proses pengobatan ini ternyata tidak hanya mengena pada sel kanker yang dituju, akan tetapi ada juga sel normal yang ikut terbunuh. Selain itu, masih ada efek samping lain dari penggunaan radioterapi, yaitu pasien akan mengalami kelelahan yang dirasakan selepas dari pelaksanaan radioterapi. Efek samping lainnya akan terjadi pada kulit, yaitu kulit akan memerah setelah beberapa minggu. Kulit juga akan mengalami rasa gatal dan sakit pasca pengobatan.

## **6.2. Terapi Radiasi**

Dari ketiga metode terapi kanker seperti yang telah dikemukakan pada bagian 6.1, terlihat ada beberapa kelemahan dan keterbatasan masing-masing metode untuk pengobatan kanker. Peningkatan jumlah penderita kanker di dunia, serta sulitnya pengobatan kanker-kanker jenis tertentu, telah mendorong para peneliti untuk mencari suatu metode yang dapat dengan efektif dan efisien mengobati kanker secara tuntas, dengan sedikit

efek samping pada pasien. Pemanfaatan teknik nuklir ternyata mampu memberikan beberapa jalan alternatif untuk masalah ini. Pemanfaatannya dalam bidang kesehatan terus menunjukkan peningkatan dari waktu ke waktu [40].

Dalam bidang kedokteran, teknik nuklir dimanfaatkan untuk tindakan-tindakan radiodiagnosis, radioterapi dan kedokteran nuklir [43]. Ketiga jenis kegiatan tersebut umumnya menggunakan sumber radiasi yang spesifikasi fisiknya berbeda-beda. Ada dua jenis sumber radiasi, yaitu sumber terbungkus dan sumber terbuka. Sumber terbungkus umumnya dirancang beraktivitas sangat tinggi sehingga laju dosis radiasi yang dipancarkannya juga tinggi. Sedang radiasi dari sumber terbuka digunakan dalam kegiatan kedokteran nuklir untuk tujuan diagnosis, terapi dan penelitian medik. Karena berinteraksi langsung dengan tubuh manusia, sumber terbuka diberikan kepada tubuh pasien dengan aktivitas rendah.

Radioterapi adalah cara pengobatan penyakit kanker menggunakan radiasi dengan energi dan dosis tinggi [44]. Radiasi itu difokuskan pada jaringan kanker dengan tujuan untuk membunuh dan menghentikan pertumbuhan sel-sel kanker. Istilah radioterapi juga dikenal dengan sebutan terapi radiasi. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah membawa bidang keilmuan onkologi radiasi menjadi ilmu yang mandiri dan mampu berkolaborasi dengan metode pengobatan kanker lainnya yang sudah berkembang lebih dahulu, yaitu pembedahan dan kemoterapi. Dengan menggunakan radiasi dalam dosis yang teratur selama jangka waktu tertentu, terapi ini dapat langsung membunuh sel kanker serta mengubah kromosom dan DNA agar sel tidak membelah diri dan menimbulkan tumor.

Teknik nuklir memiliki peran yang cukup penting dalam mengatasi masalah penyakit kanker di berbagai belahan dunia [40]. Aplikasi teknik nuklir dalam bidang kedokteran melibatkan penggunaan radiasi pengion yang dipancarkan oleh radioisotop dan atau sumber radiasi lainnya. Di negara-negara maju, satu di antara tiga pasien rumah sakit mendapatkan perlakuan medis dengan teknik nuklir. Di Amerika Utara, setiap harinya sekitar 40.000 prosedur medis dilakukan menggunakan radioisotop untuk diagnosis dan terapi berbagai penyakit yang dilaksanakan baik di klinik-klinik maupun di rumah sakit-rumah sakit besar. Saat ini, sekitar 500.000

manusia setiap tahunnya diselamatkan hidupnya dari keganasan kanker menggunakan radiasi.

Pemanfaatan teknik nuklir dalam bidang biologi dan kedokteran pertama kali dilakukan oleh dermatologi Perancis Henry A. Danlos (1844-1912) pada 1901. Saat itu ia melakukan pengobatan penyakit tuberkulosis pada kulit menggunakan radioisotop radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ). Selanjutnya pada 1920-an, George de Harvesy (1885-1966) dan kawan-kawannya mempelajari distribusi dan metabolisme radioisotop alam seperti timbal-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ), bismuth-214 ( $^{214}\text{Bi}$ ) dan thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) dalam tanaman dan hewan. Pada 1927, perintis kedokteran nuklir Hermann L. Blumgart (1896-1977) dan Soma Weiss (1898-1942) melaporkan hasil penelitiannya mengenai kecepatan sirkulasi darah pada organ normal dan pasien berpenyakit jantung menggunakan radioisotop alam berupa gas radon-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) yang dilarutkan dalam larutan garam fisiologik [46].

Pada 1934, Jean Frederic Joliot (1900-1958) dan Irene Joliot-Curie (1897-1956) berhasil menemukan radioisotop buatan phosphor-32 ( $^{32}\text{P}$ ) [3]. Harvesy merupakan peneliti pertama yang memanfaatkan radioisotop buatan tersebut sebagai perunut pada hewan percobaan. Memasuki akhir 1938, berbagai jenis radioisotop buatan telah berhasil diproduksi menggunakan siklotron. Sejak saat itu, pemanfaatan radioisotop dalam kedokteran menunjukkan perkembangan yang cukup berarti. Pada 1949, Benedict Cassen (1902-1972) berhasil memetakan kelenjar gondok menggunakan radioisotop iodine-131 ( $^{131}\text{I}$ ). Perkembangan penting berikutnya adalah terjadi pada 1957 ketika Hal Oscar Anger (1920-2005) berhasil menemukan kamera gamma [46].

Tidak berselang lama dari saat penemuan sinar-X oleh Roentgen pada 1895, para dokter mulai menemukan jalan dalam memanfaatkan sinar-X untuk penanganan kanker. Tidak berselang lama dari penemuan sinar-X, Marie Curie (1867-1934) pada 1897 menemukan zat radioaktif radium. Zat itu kemudian digunakan sebagai salah satu cara terapi radiasi dan menjadi pelopor lahirnya pengobatan kanker dengan teknik brakhiterapi [106]. Sejalan dengan penemuan-penemuan baru di bidang radiofisika dan radiobiologi, berkembang pula penerapan temuan-temuan tersebut dalam bidang radioterapi. Dikembangkan pula teknik-teknik

penyinaran, sehingga radiasi dapat diberikan pada pasien secara akurat dan aman.

Para ilmuwan mulai memperoleh pengetahuan mengenai adanya perbedaan kepekaan berbagai jenis jaringan terhadap radiasi, jenis diferensiasi tumor serta kadar oksigen dalam jaringan. Jika semula pengetahuan tentang dosimetri sinar-X belum dilibatkan dalam pengobatan kanker, akhirnya diketahui pula bahwa pemberian dosis radiasi harus dilakukan dengan metode fraksinasi, yakni dosis yang diberikan sebanyak 180 – 200 rad (sekarang menjadi *centi Gray* dan disingkat *cGy*, di mana 1 rad = 1 cGy) untuk setiap kali penyinaran, dengan rata-rata diberikan sebanyak lima kali dalam seminggu dengan jumlah total 25 sampai 30 kali penyinaran [44].

Teknik penyinaran sebagaimana dikemukakan di atas merupakan dasar pemberian radiasi konvensional pada masa awal perkembangan onkologi radiasi. Dalam perkembangan selanjutnya, metode pemberian dosis ini dapat dimodifikasi menjadi 10 kali per minggu dengan dosis untuk setiap kali penyinaran bisa lebih rendah atau tetap. Modifikasi ini disebut sebagai hiperfraksinasi. Perubahan teknik penyinaran sel kanker ini dilakukan setelah diketahui bahwa sel, baik yang sehat maupun kanker, mempunyai daur normal yang terbagi atas fase sintesis (S), fase mitosis (M) dan fase gap (G, terdiri atas G1 dan G2).

Dalam perjalanan hidupnya, sel penyusun tubuh tidaklah statis, namun ia senantiasa melakukan kegiatan memperbanyak diri. Dalam konteks perkembangbiakan, pembelahan sel bertujuan agar reproduksi dan embriogenesis dapat berkelanjutan. Fase S merupakan tahap terjadinya replikasi DNA. Pada umumnya, sel tubuh manusia membutuhkan waktu sekitar delapan jam untuk menyelesaikan tahap ini [75]. Hasil replikasi kromosom yang telah utuh, segera dipilah bersama dengan dua nuklei masing-masing guna proses mitosis pada fase M. Interval waktu fase M kurang lebih satu jam, merupakan tahap di mana terjadi pembelahan sel (baik pembelahan biner maupun pembentukan tunas). Pada mitosis, sel membelah dirinya membentuk dua sel anak yang saling terpisah.

Diketahui bahwa sel kanker memiliki kepekaan yang sangat tinggi terhadap radiasi pada saat sel berada pada fase M. Radiasi mampu

menghancurkan material genetik sel kanker sehingga sel itu tidak dapat membelah dan tumbuh kembali. Sementara itu, jaringan sehat memiliki kemampuan atau daya tahan yang lebih tinggi dalam mempertahankan atau memperbaiki kerusakan yang terjadi akibat radiasi dibandingkan sel-sel kanker, dan memiliki toleransi ketahanan sampai dosis radiasi tertentu [107]. Kebanyakan sel normal dan sehat mampu memulihkan diri dari efek radiasi. Dokter selalu berusaha untuk menghancurkan sel kanker sambil sedapat mungkin menghindari paparan radiasi terhadap sel-sel sehat di sekitarnya.

Kanker atau keganasan adalah suatu penyakit yang memerlukan penanganan multifaktorial, meliputi: operasi, kemoterapi, radiasi, terapi hormonal, dan terapi biologi. Seringkali pengobatan kanker memerlukan kombinasi berbagai jenis terapi tersebut, misal operasi dilanjutkan dengan radiasi dan kemoterapi, atau operasi dengan radiasi saja, atau radiasi dengan kemoterapi [105]. Antara 60 hingga 70 persen pasien kanker memerlukan radioterapi dalam salah satu terapinya. Di negara maju dengan tingkat pelayanan dan ketersediaan fasilitas radioterapi yang sudah baik, sekitar 50-60 persen dari seluruh pasien kanker memperoleh pelayanan pengobatan kanker dengan teknik radioterapi [102]. Radiasi bisa digunakan untuk mengobati hampir semua jenis tumor padat termasuk kanker otak, payudara, leher rahim, tenggorokan, paru-paru, pankreas, prostat, kulit, dan sebagainya, bahkan juga leukemia dan limfoma.

Salah satu sifat dari radiasi pengion adalah memiliki kemampuan mengionkan materi yang dilaluinya [18]. Proses pengionan dapat terjadi karena adanya transfer energi dari radiasi kepada materi (dalam hal ini sel kanker), atau dengan kata lain terjadi penyerapan energi radiasi oleh materi. Karena proses pengionan itu, sel kanker yang dipapari radiasi menjadi rusak. Terapi kanker dengan radiasi dimungkinkan karena sel-sel kanker secara umum mempunyai kepekaan yang lebih tinggi terhadap radiasi pengion dibandingkan sel-sel normal. Terapi radiasi berfungsi merusak sel kanker dengan menghancurkan materi genetika sel yang mengontrol pertumbuhan dan pembelahan diri sel kanker. Dengan pengaturan pemberian dosis radiasi secara tepat, radiasi tersebut dapat membunuh sel-sel kanker dengan sedikit efek kerusakan terhadap sel-sel normal di sekitarnya.

Radioterapi dengan sinar-X mengandalkan kemampuan sinar itu dalam menghancurkan sel kanker. Jika sinar-X ditembakkan pada suatu sasaran, elektron-elektron dalam atom sasaran itu akan menyerap energi foton sinar-X sehingga elektron memiliki energi yang cukup untuk melepaskan diri dari ikatan inti atom. Proses lepasnya elektron ini disebut pengionan. Elektron-elektron hasil pengionan inilah yang berperan besar dalam proses penghancuran sel kanker [107]. Dalam perjalanannya di dalam organ, elektron akan mengionkan molekul DNA dalam sel, sehingga sel-sel kanker mengalami kerusakan yang akhirnya mati.

Terapi radiasi dapat dilakukan sebagai pengobatan kuratif, *adjuvant*, atau paliatif bagi pasien kanker [44]. Sebagai pengobatan kuratif, terapi ini disarankan bagi pasien tumor. Terapi diharapkan dapat membunuh sel kanker dan mencegah penyebaran kanker ke organ lain. Terapi radiasi dapat dilakukan pada pasien yang tumornya berukuran kecil atau pasien kanker stadium awal. Pengobatan *adjuvant* berarti terapi radiasi dilakukan sebagai bagian dari rencana multipengobatan, yang dapat meliputi operasi bedah dan kemoterapi. Sebagai contoh, dalam terapi *neo-adjuvant*, terapi radiasi dipakai untuk mengecilkan volume tumor sebelum operasi. Terapi ini juga dapat digunakan dalam terapi sistemis *adjuvant*, di mana radiasi dan kemoterapi dilakukan pada saat yang bersamaan. Dalam hal ini terapi radiasi dipakai untuk menghentikan pertumbuhan sel kanker yang masih ada setelah operasi.

Sebagian besar penderita kanker akan menerima terapi radiasi sebagai bagian dari pengobatan. Radioterapi dimanfaatkan oleh para dokter untuk membantu pengobatan hampir pada semua jenis kanker [105]. Terapi ini juga berguna dalam mengobati beberapa jenis tumor jinak. Radioterapi dapat diterapkan secara mandiri tanpa pengobatan lain atau dalam kombinasi dengan perawatan lain seperti operasi atau kemoterapi. Dalam beberapa kasus, terapi radiasi merupakan satu-satunya jenis pengobatan untuk kanker. Kombinasinya dengan jenis pengobatan lain seperti kemoterapi dapat dipakai untuk meningkatkan keefektifan daya hancurnya terhadap sel kanker. Pada kanker stadium lanjut, terapi radiasi dimanfaatkan untuk meringankan gejala yang disebabkan oleh kanker yang dikenal sebagai terapi paliatif.

Pelaksanaan radioterapi dilakukan dengan cara menyinari radiasi pada bagian tubuh pasien di mana kanker bersarang seperti ditunjukkan pada Gambar 6.2. Pada kebanyakan tipe kanker, radiasi biasanya diberikan dengan dosis terbagi dalam lima hari berturut-turut, sekali penyinaran setiap harinya. Total penyinaran berlangsung kurang lebih selama enam hingga tujuh minggu. Besaran dosis total yang diberikan bergantung pada tujuan terapi (kuratif atau paliatif) dan jenis histopatologinya. Dosis untuk tujuan kuratif umumnya diberikan sebanyak 25 - 30 kali, lima kali dalam satu minggu dengan dosis untuk setiap penyinarannya sebesar 1,8 - 2 Gy. Dosis paliatif umumnya diberikan sebanyak 5-20 kali, dengan dosis untuk setiap penyinarannya 2-5 Gy [44].



Gambar 6.2 Radioterapi untuk pengobatan kanker menggunakan radiasi pengion [108]

Umumnya pelaksanaan radioterapi membutuhkan waktu kurang lebih 15-30 menit mulai dari saat pasien masuk ke ruang radioterapi, masa penyinaran, sampai pasien keluar dari ruang radioterapi. Kebanyakan pasien menjalani terapi radiasi sebagai pasien rawat jalan, kecuali ada indikasi medis untuk rawat inap. Selama menjalani pengobatan dengan radioterapi, pasien tetap dapat bekerja atau melaksanakan aktivitas sehari-hari seperti biasanya, sepanjang pasien merasa kuat untuk beraktivitas.

### 6.3. Perkembangan Terkini

Dalam perkembangan berikutnya, jenis radiasi pengion yang digunakan di dunia medis bukan hanya sinar-X saja, melainkan berkembang dengan melibatkan berbagai jenis radiasi pengion lain seperti sinar gamma yang diperoleh atau dipancarkan oleh unsur radioaktif seperti radium (Ra), kobalt (Co), sesium (Cs), iridium (Ir). Jenis radiasi lainnya yang kini juga banyak dimanfaatkan untuk radioterapi kanker adalah elektron, atau berupa partikel seperti proton dan neutron. Belakangan ini di beberapa negara maju telah dirintis penggunaan ion berat seperti karbon (C).

Tujuan dari radioterapi adalah untuk memberikan dosis radiasi setepat-tepatnya (akurasi maupun presisi) terhadap jaringan yang sakit (*target volume*) tanpa memberikan efek atau kerusakan yang berarti pada jaringan sehat di sekitarnya [40]. Jika mungkin, radiasi pengion tadi hanya didistribusikan pada jaringan kanker atau tumor saja. Kemajuan fisika radioterapi telah memungkinkan tercapainya tujuan tersebut melalui beberapa metode. Untuk keperluan radioterapi, selama ini ada teknik pengobatan yang dikenal dengan sebutan teleterapi, yaitu terapi kanker atau tumor menggunakan sumber radiasi yang tidak bersinggungan dengan pasien (sumber radiasi eksternal). Dalam teknik ini, radiasi dari suatu sumber berupa radioisotop terbungkus atau pesawat pembangkit radiasi lainnya seperti sinar-X diarahkan dan difokuskan pada kanker atau bagian tubuh yang akan diradiasi.

Selain teleterapi, ada juga teknik terapi kanker yang dikenal dengan nama brakiterapi, yaitu suatu teknik untuk terapi kanker di mana sumber radiasinya bersinggungan langsung dengan pasien, misal pada pengobatan kanker rahim [109]. Teknik brakiterapi dilakukan dengan cara menempatkan sumber radiasi terbungkus langsung di dekat atau di lokasi kanker itu sendiri. Sumber selanjutnya melakukan penyinaran radiasi dosis tinggi pada sel tumor dengan dampak minimal pada jaringan sehat di sekitarnya. Teknik yang lainnya disebut pisau gamma (*gamma knife*) atau pisau sinar-X (*X-knife*) yang menggunakan sinar gamma atau sinar-X untuk terapi tumor otak dan gangguan lain dalam otak.

Radiasi pengion jenis foton yang dapat dimanfaatkan untuk radioterapi kanker adalah sinar gamma dan sinar-X. Kedua jenis radiasi

tersebut mempunyai daya tembus yang tinggi terhadap organ tubuh dengan kemampuan tembusnya ditentukan oleh besar energi yang dimilikinya. Sinar gamma merupakan jenis radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop. Jadi dalam radioterapi dengan sinar gamma digunakan pesawat yang di dalamnya terdapat radioisotop pemancar sinar gamma [110]. Radioisotop cobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) merupakan sumber sinar gamma yang dapat diandalkan dan banyak digunakan sebagai sumber radiasi dalam pesawat radioterapi. Radioisotop ini mempunyai umur paro 5,3 tahun dengan energi sinar gamma yang dipancarkannya 1.250 keV (1,25 MeV). Sumber  $^{60}\text{Co}$  dapat dibuat dalam reaktor penelitian melalui aktivasi neutron terhadap unsur stabilnya  $^{59}\text{Co}$ .

Perkembangan metode dalam onkologi radiasi banyak dipengaruhi oleh kemajuan teknologi, baik dari segi mekanik, elektronik dan terutama komputer. Radiasi eksternal yang tadinya diberikan dengan lapangan sederhana, saat ini dimungkinkan untuk diberikan lapangan multipel tanpa atau dengan alat bantu, dalam keadaan statis atau dinamis. Semua ini bertujuan untuk memperoleh hasil pengobatan yang optimal berupa penghancuran jaringan kanker semaksimal mungkin dan kerusakan jaringan sehat seminimal mungkin. Dengan demikian akan diperoleh tingkat penyembuhan yang baik untuk menunjang hidup jangka panjang dengan mempertahankan fungsi organ normal. Pasien kanker masih dapat menjalani kehidupannya dengan kualitas hidup yang tetap tinggi. Sekitar empat dari sepuluh kasus kanker berhasil disembuhkan dengan menggunakan radioterapi sebagai bagian dari pengobatan. Namun hasil dari radioterapi bergantung pada jenis dan tahap kanker serta pengobatan lain yang diterima pasien.

Untuk memperoleh hasil pengobatan kanker yang optimal, pengobatan radiasi seringkali dikombinasikan antara radiasi eksternal dengan brakhiterapi [110]. Pemberian brakhiterapi metode *afterloading* dengan sumber isotop laju dosis tinggi merupakan perkembangan terkini, yang sekalipun telah dilakukan sejak puluhan tahun lalu, masih banyak memberi manfaat pada pengobatan berbagai jenis kanker. Brakhiterapi dapat dilakukan dengan metode intrakaviter, intraluminal ataupun dengan cara mengimplantasikan jarum-jarum radioaktif ke dalam jaringan tumor dan jaringan sehat sekitarnya.

Perkembangan dan kemajuan ilmu pengetahuan serta teknologi pencitraan dan teknik komputer memungkinkan untuk melokalisir dan mengarahkan berkas radiasi hanya pada sel-sel kanker saja, sehingga mengurangi paparan radiasi pada sel-sel sehat di sekitarnya. Lahirlah beberapa metode baru radioterapi yang digunakan untuk memerangi sel kanker, yaitu [44]:

- Radioterapi berpandu pencitraan atau *image-guided radiation therapy* (IGRT) yang memungkinkan penyinaran radiasi menjadi lebih akurat mengarah pada sel kanker. Pencitraan digunakan untuk memandu dalam mengarahkan radiasi agar memudahkan perencanaan dan pengobatan kanker.
- Radioterapi dengan intensitas termodulasi atau *intensity modulated radiation therapy* (IMRT) yang berguna untuk pengobatan kanker pada bagian kepala dan leher. Teknik ini memungkinkan berkas radiasi yang digunakan untuk radioterapi mengikuti bentuk tumor sehingga meminimalisir pemaparan terhadap jaringan sehat di sekitarnya.
- *Stereotactic radiation therapy* (SRT) yang dapat digunakan untuk mengarahkan berkas radiasi pada kanker berukuran kecil.

Perkembangan metode radioterapi IMRT dapat menggantikan brakhiterapi pada beberapa jenis keganasan. Perkembangan ini juga membuahakan metode pemaparan radiasi yang terarah pada satu titik (*pin point*) untuk penanganan kelainan pada jaringan otak menggunakan radiasi stereotaktik, yaitu metode pencitraan terperinci dalam 3D serta pemberian radiasi dosis tinggi secara akurat. Dengan radiasi stereotaktik akan diperoleh daerah radiasi yang terbatas hanya pada kelainan dan tidak pada jaringan otak yang sehat. Alat yang digunakan untuk melakukan kegiatan ini dikenal sebagai pisau gamma apabila digunakan sumber  $^{60}\text{Co}$ , atau pisau-X apabila digunakan sinar X.

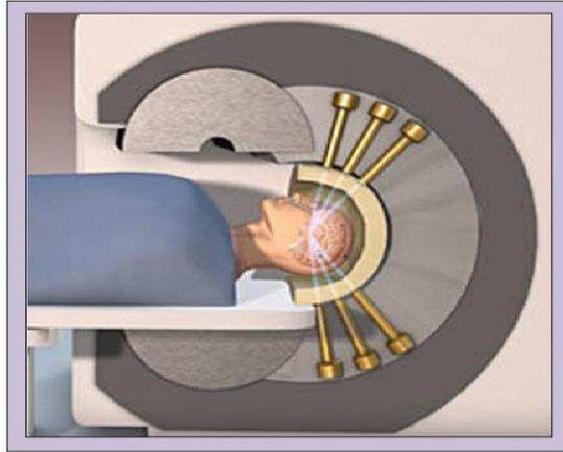
Otak merupakan organ yang sangat penting di dalam tubuh manusia. Ia berfungsi sebagai pusat komando untuk seluruh kegiatan di dalam tubuh. Otak juga berhubungan dengan setiap organ dan anggota tubuh melalui sistem saraf, untuk menghubungkan manusia dengan sekeliling. Tanpa otak, manusia tidak akan mampu untuk menggunakan lima inderanya, berpikir, mengekspresikan emosi, bergerak, menyimpan

informasi atau menganalisis semua informasi yang didapatkan dari lingkungan sekitar [75]. Mengingat otak memiliki peran yang demikian penting, maka organ ini dilindungi oleh tulang tengkorak, lapisan cairan dan ditutup oleh rambut yang dapat melindungi otak dari sinar matahari.

Mengingat pentingnya fungsi otak, gangguan yang terjadi pada otak dapat menjadi masalah kesehatan yang serius dan harus segera diatasi. Untuk gangguan otak tertentu, obat dapat digunakan untuk menghilangkan gejalanya. Tetapi, untuk beberapa kondisi seperti tumor, gangguan pembuluh darah, kerusakan jaringan otak atau stroke, seringkali operasi merupakan satu-satunya pilihan untuk penyembuhan. Karena sifat dasar otak yang sensitif, operasi untuk organ ini bukanlah satu hal yang mudah.

Banyak hal yang harus diperhatikan selama proses pembedahan otak. Bahkan bila operasi tidak berjalan sebagaimana mestinya, proses ini bisa menyebabkan kerusakan permanen. Setelah menjalani operasi otak, pasien juga harus menjalani masa pemulihan yang lama dan beberapa bulan terapi sebelum dapat meninggalkan rumah sakit. Pisau gamma/X merupakan salah satu metode pengobatan *radiosurgery* atau bedah radiasi untuk mendestruksi tumor di dalam otak tanpa harus melakukan pembedahan [111]. Alat tersebut memanfaatkan sinar gamma/X yang digunakan untuk pengobatan tumor dan kelainan-kelainan lainnya di otak tanpa membuka tulang tengkorak. Alat ini mampu memancarkan 200 berkas radiasi yang difokuskan ke satu titik tempat bersarangnya tumor atau target lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 6.3. Setiap pancaran sinar mempunyai dampak kecil terhadap sel otak yang dilaluinya, namun memberikan dosis radiasi yang cukup besar pada lokasi target di mana semua berkas pancaran radiasi itu bertemu.

Operasi dengan pisau gamma/X merupakan kemajuan besar dalam operasi kelainan pada otak. Dalam tiga sampai empat dekade terakhir, pisau gamma/X telah mengubah gambaran tentang pembedahan saraf. Perkembangannya menawarkan perawatan pembedahan pada pasien dengan tumor otak dan malformasi vaskular dengan pilihan pengobatan yang aman, akurat dan dapat diandalkan. Sebagai bentuk dari *radiosurgery*, pisau gamma/X menawarkan alternatif terapi pada pasien yang tidak memungkinkan untuk dilakukan bedah otak, namun memiliki gangguan otak yang harus segera ditangani.



Gambar 6.3 Teknik pisau gamma untuk radioterapi kanker otak [112]

Tidak seperti teknologi lain yang didesain untuk menyembuhkan berbagai bagian tubuh, pisau gamma/X hanya didesain untuk mengobati kelainan otak. Teknologi pengobatan penyakit otak ini hadir setelah melalui proses penelitian klinis lebih dari 40 tahun dan 700.000 pasien kelainan otak yang telah ditangani di seluruh dunia. Sebagai alat bedah, pisau gamma/X memiliki akurasi hingga 0,2 mm. Hal ini memungkinkan pisau gamma/X mencapai target operasi yang terletak jauh di dalam otak dan tulang bagian belakang kepala dan leher. Terapi ini juga bisa digunakan sebagai perawatan primer atau sebagai bagian dari metode perawatan lain seperti operasi, terapi radiasi lain atau kemoterapi.

Keakuratan operasi pisau gamma/X hampir tidak mengakibatkan kerusakan pada sel-sel yang berada di sekitar target penyinaran. Bahkan, dalam beberapa kasus hanya menimbulkan sedikit efek samping dibandingkan dengan perawatan radiasi biasa. Radiasi sinar gamma atau sinar-X digunakan untuk menghancurkan sel-sel otak yang sakit, sementara sel-sel otak lainnya yang masih sehat tetap terjaga. Adapun keuntungan dari penggunaan alat ini adalah [111]:

- **Noninvasif** karena pisau gamma/X tidak memerlukan pembiusan total dan juga tidak mempunyai risiko yang berhubungan dengan tindakan operasi seperti perdarahan, infeksi, kebocoran cairan serebrospinal ataupun penyakit lainnya.

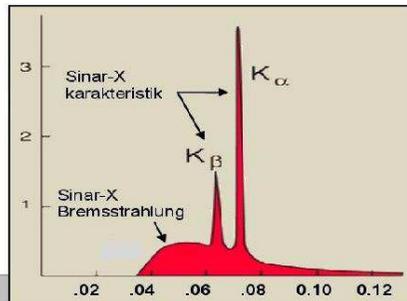
- **Akurasi yang tinggi** karena pisau gamma/X didesain untuk mencapai target operasi yang terletak jauh dalam otak dan tulang belakang bagian kepala dan leher dengan akurasi sampai 0.15 mm.
- **Efek samping minimal** karena pisau gamma/X tidak menyebabkan defisit kognitif, rambut rontok, mual, kelelahan ataupun efek samping lain yang biasanya timbul pada terapi radiasi konvensional.
- **Pilihan terapi yang serba bisa** karena pisau gamma/X dapat diatur kekuatannya dan dapat dipancarkan ke berbagai arah sehingga memiliki kemampuan untuk mencapai beberapa titik dalam satu kali sesi terapi. Hingga kini belum ada pilihan terapi lain yang dapat memberikan manfaat seperti ini.
- **Pemulihan yang cepat** karena pisau gamma/X tidak menimbulkan rasa sakit dan hanya membutuhkan waktu beberapa menit hingga beberapa jam saja. Pasien dapat langsung pulang pada hari yang sama setelah penanganan dan melanjutkan aktivitas harian normalnya dengan segera.
- **Sesi terapi tunggal** karena pisau gamma/X adalah satu-satunya metode terapi noninvasif yang dapat dilakukan dalam sesi tunggal dengan perencanaan terapi pada hari yang sama.
- **Alat bedah saraf yang spesifik** karena pisau gamma/X adalah satu-satunya alat yang didesain secara khusus untuk memberi terapi pada daerah otak, kepala dan leher.
- **Terapi yang paling teruji** karena lebih dari 500.000 pasien di seluruh dunia telah menjalankan terapi pisau gamma/X dan mendapatkan kualitas hidup yang lebih baik berkat bantuan alat ini. Prosedur pisau gamma/X telah didokumentasikan di lebih dari 2.500 publikasi ilmiah jurnal kedokteran ilmu penyakit saraf terkemuka di dunia.

Masalah gangguan kesehatan otak yang bisa diatasi dengan *gamma/X knife* antara lain adalah tumor otak, termasuk tumor metastasis otak, kelainan pembuluh darah di otak, seperti *arteriovenous malformation* (AVM), perawatan kelainan fungsional, seperti trigeminal neuralgia, yaitu suatu nyeri di wajah karena gangguan saraf. Banyak kelainan otak lainnya yang sampai saat ini sedang dalam penelitian, seperti penyakit parkinson dan epilepsi. Tingkat kesuksesan *gamma/X knife* bergantung pada ukuran

tumor. Tumor tertentu bahkan bisa mencapai 100%, seperti meningioma, yakni tumor jinak dan tumor neuroma yang menyerang saraf perifer di kepala [111].

Perkembangan pengetahuan mengenai kemoterapi serta antibodi monoklinal sebagai kombinasi radiasi, baik sebagai *neo-adjuvant*, konkomitan serta *adjuvant* telah memberikan tempat tersendiri bagi pengobatan penyakit kanker secara terintegrasi [113]. Pemberian kemoterapi digunakan antara lain untuk memperkecil tumor sedemikian rupa sehingga lapangan radiasi menjadi lebih kecil, dan memberi keuntungan berupa rendahnya efek samping lokal akibat radiasi. Apabila kemoterapi ini diberikan bersamaan dengan radiasi, maka diharapkan terjadi efek sinergi yang mengakibatkan tumor menjadi lebih peka terhadap radiasi dibanding apabila radiasi diberikan secara mandiri. Kemoterapi ini juga memberikan keuntungan karena kemampuannya mencegah terjadinya metastasis, sementara radiasi hanya membunuh jaringan kanker yang tercakup dalam lapangan radiasi.

# 7



## PENELITIAN MEDIS

Pada pembahasan Bab 2 telah dikemukakan mengenai spektrum energi sinar-X yang terdiri atas spektrum energi lebar dan kontinyu untuk sinar-X Bremsstrahlung dan spektrum energi diskret berupa garis-garis yang tajam untuk sinar-X karakteristik. Adanya dua jenis spektrum energi sinar-X itu sendiri muncul karena berlangsungnya interaksi elektron dengan bagian-bagian di dalam atom. Interaksinya dengan inti atom akan menghasilkan sinar-X Bremsstrahlung, sedang interaksinya dengan elektron-elektron yang mengisi orbit bagian dalam dapat menghasilkan sinar-X karakteristik. Interaksi itu begitu spesifik dan sinar-X yang dipancarkan sangat bersesuaian dengan jenis atom yang memancarkannya, sehingga pancaran sinar-X karakteristik dapat dipakai untuk mencirikan atau mengidentifikasi atom yang memancarkannya.

Penemuan kedua jenis sinar-X tersebut ternyata memberi manfaat yang besar dalam kehidupan umat manusia. Sinar-X Bremsstrahlung memiliki peran besar dalam kegiatan medis, baik untuk tujuan pencitraan medis maupun onkologi radiasi. Sedang penemuan sinar-X karakteristik mempunyai arti penting dalam perkembangan riset fisika, di mana temuan itu dalam kurun waktu berikutnya berhasil memicu riset-riset yang menghasilkan temuan-temuan baru lainnya. Dengan mengamati pancaran sinar-X karakteristik, Henry Moseley (1887-1915) bisa mempelajari struktur atom bagian dalam, menentukan muatan listrik inti untuk

memperbaiki urutan penempatan posisi atom pada tabel periodik yang sebelumnya didasarkan pada urutan berat atomnya, serta menambahkan jenis atom ke dalam tabel periodik [26].

Pancaran sinar-X karakteristik juga dimanfaatkan secara luas untuk mendeteksi keberadaan unsur-unsur kelumit dalam berbagai bidang kehidupan, seperti studi lingkungan, kesehatan, kedokteran forensik dan kriminologi [114]. Pengertian dari unsur kelumit (*trace element*) adalah unsur atau elemen yang keberadaannya dalam suatu sampel memiliki konsentrasi rata-rata kurang dari 100 bagian per juta (*part per million, ppm*) atom atau kurang dari 100 mikrogram per gram berat sampel. Meski jumlahnya sangat kecil atau kadarnya sangat rendah, keberadaan unsur kelumit seringkali memiliki arti yang sangat penting dalam berbagai bidang kehidupan.

### **7.1. Unsur Kelumit**

Beberapa jenis unsur kelumit dibutuhkan oleh tubuh manusia dan hewan tingkat tinggi hanya beberapa miligram setiap harinya. Namun ketiadaan unsur kelumit itu dalam tubuh ternyata dapat berdampak buruk pada kondisi kesehatan manusia. Banyak unsur dengan kuantitas kelumit dalam jaringan makhluk hidup. Ada 17 unsur kelumit yang kini diketahui memiliki fungsi hayati bagi tubuh hewan dan manusia [115]. Besi (Fe), iodin (I) dan zink (Zn) merupakan beberapa contoh unsur kelumit yang dibutuhkan oleh tubuh manusia. Zat besi merupakan unsur kelumit terpenting bagi manusia, dengan konsentrasi tinggi terdapat dalam sel darah merah. Besi merupakan komponen utama hemoglobin yang berfungsi mengangkut oksigen dari paru menuju sel-sel tubuh yang membutuhkannya untuk metabolisme glukosa, lemak dan protein menjadi energi. Kekurangan zat besi akan berpengaruh terhadap pembentukan hemoglobin darah. Besi juga ditemukan dalam berbagai jenis enzim. Di dalam tubuh, rata-rata hanya terdapat empat gram besi untuk laki-laki dan tiga gram besi untuk perempuan.

Karena diperlukan oleh tubuh manusia, keberadaan unsur kelumit dalam bahan makanan juga perlu mendapatkan perhatian. Berdasarkan kuantitas yang diperlukan oleh tubuh manusia, maka nutrisi (zat gizi) dikategorikan dalam dua kelompok besar, yaitu mikronutrien dan

makronutrien [115]. Mikronutrien adalah nutrien yang diperlukan oleh tubuh sepanjang hidup dalam jumlah sangat kecil untuk mengatur dan menyelenggarakan fungsi-fungsi fisiologis tubuh. Meski jumlahnya sangat kecil, mikronutrien tidak dapat diproduksi sendiri oleh tubuh, melainkan harus disuplai melalui konsumsi bahan makanan tertentu. Mikronutrien terdiri atas empat kelompok nutrien, yaitu: makromineral, asam organik, mineral kelumit dan vitamin. Kekurangan mikronutrien tertentu dalam tubuh dapat berakibat ancaman serius bagi kesehatan.

Selain besi, mangan (Mn) juga merupakan salah satu mineral kelumit yang memiliki peran penting dalam tubuh. Keberadaan mineral Mn dapat ditemukan di beberapa jaringan tubuh seperti tulang, hati, ginjal, pankreas, kelenjar adrenal, dan kelenjar pituitari. Mineral Mn bermanfaat membantu pertumbuhan tulang yang sehat dan padat. Sebagian besar Mn di dalam tubuh kita terdapat dalam struktur tulang. Radikal bebas yang berlebihan di dalam tubuh sangat reaktif dan dapat menyerang sel-sel tubuh sehingga menyebabkan kerusakan. Mineral Mn diketahui memiliki sifat antioksidan yang dapat menangkal reaktivitas radikal bebas di dalam tubuh. Mencukupi kebutuhan asupan mineral Mn dari makanan alami bermanfaat membantu mempertahankan kadar glukosa darah dalam keadaan normal. Tubuh manusia membutuhkan mineral Mn untuk membantu menjaga kesehatan sistem syaraf. Mineral Mn diketahui berperan membantu fungsi koordinasi antara otak, syaraf, dan otot. Mineral ini juga turut berperan dalam membantu fungsi kelenjar tiroid, yaitu kelenjar yang memproduksi hormon tiroksin yang dikenal sangat penting bagi metabolisme tubuh.

Iodin (I) merupakan unsur kelumit yang esensial untuk pertumbuhan dan perkembangan normal. Sekitar 60 persen I dalam tubuh tersimpan dalam kelenjar tiroid. Iodin berperan penting dalam menjaga fungsi normal kelenjar tiroid dengan menghasilkan hormon tiroid yang mengendalikan laju metabolisme dalam tubuh. Defisiensi I dapat memiliki efek serius bagi kesehatan tubuh manusia. Gejala defisiensi I antara lain keterbelakangan mental, penyakit gondok, kenaikan berat badan tidak normal, berkurangnya kesuburan, kulit kasar, konstipasi, dan lesu.

Kekurangan I menyebabkan kelainan pada kelenjar tiroid yang disebut penyakit gondok. Karena serangan penyakit ini maka kelenjar

tiroid tidak dapat menghasilkan hormon tiroid sebagaimana mestinya. Iodin memengaruhi fungsi kelenjar tiroid dengan membantu menghasilkan hormon yang secara langsung bertanggungjawab mengendalikan laju metabolisme. Bagi tubuh manusia, I juga berperan penting dalam mengendalikan berat badan karena unsur ini menjamin penggunaan kalori secara optimum dan meminimalisir penimbunan kalori dalam bentuk lemak tubuh. Hormon tiroid berperan penting dalam menjamin pertumbuhan tubuh khususnya bagi anak-anak. Iodin diperlukan ibu hamil untuk menjamin pertumbuhan bayi yang sehat dalam kandungan. Iodin berperan penting dalam menjamin perkembangan otak, bahkan sejak usia bayi dalam kandungan. Kekurangan asupan I pada usia anak-anak dapat menyebabkan keterbelakangan mental [115].

Keberadaan beberapa jenis unsur kelumit juga bisa menimbulkan ancaman bagi kesehatan tubuh manusia. Oleh sebab itu, dalam bidang pertanian, deteksi keberadaan unsur-unsur kelumit dalam bahan makanan hasil pertanian memiliki peran sangat penting dalam kaitannya untuk mengetahui bahaya keracunan yang mungkin terjadi bagi manusia sebagai konsumen hasil pertanian itu. Analisis unsur kelumit dalam bidang pertanian perlu diperhatikan dalam kaitannya dengan pengawasan kualitas hasil panen.

Berbagai kasus kriminal telah terjadi sepanjang sejarah kehidupan umat manusia. Banyak di antara kasus itu tidak berhasil diungkap karena minimnya barang bukti yang dapat diajukan ke pengadilan. Karena kekurangan barang bukti, maka identitas korban maupun pelakunya sulit bahkan tidak dapat dikenali. Demikian pula latar belakang yang mendasari kejadian tersebut maupun tempat terjadinya kasus kriminal. Namun banyak pula kasus kriminal berhasil diungkap oleh aparat penegak hukum dengan metode tertentu yang tingkat kebenarannya dapat dipertanggungjawabkan. Keberhasilan tersebut tentu dilatari oleh keberhasilan aparat dalam menemukan barang-barang bukti yang sangat akurat, meski barang bukti tersebut bisa jadi tidak kasat mata karena jumlahnya yang sangat sedikit [116].

Penemuan unsur-unsur kelumit di tempat kejadian perkara bisa menjadi bahan pembantu dalam mengungkap kasus kriminal. Karena itu, upaya menemukan unsur-unsur kelumit seringkali ditempuh dengan

beberapa cara [117]. Unsur kelumit sebagai barang bukti bisa ditemukan pada senjata api yang digunakan untuk tindakan kriminal seperti diperlihatkan pada Gambar 7.1. Serangga bisa jadi dapat membantu seorang detektif dalam memecahkan teka-teki di tempat kejadian perkara, karena keberadaan serangga dapat dipakai sebagai petunjuk waktu kematian korban kriminal. Bahkan lintah pun masuk dalam jajaran binatang yang dinilai penting untuk dipertimbangkan sebagai alat untuk membantu mengungkap kasus kejahatan. Sebagaimana hal ini pernah dipraktikkan oleh polisi untuk mengungkap kasus kriminal di Australia.



Gambar 7.1 Kasus kriminal bisa diungkap melalui penemuan unsur kelumit dalam senjata api [116]

Tahun 2008, *National Geographic* melaporkan bahwa polisi Australia berhasil membekuk tersangka pelaku perampokan bersenjata yang terjadi pada 2001 berkat bantuan lintah. Detektif yang menangani kasus itu mengambil sampel darah dari seekor lintah yang mungkin saja mengandung darah dari salah seorang tersangka perampokan pada sebuah rumah perempuan berusia 71 tahun di Tasmania. Mengingat rumah perempuan tersebut berada di daerah hutan, tidak mustahil lintah yang ditemukan di tempat kejadian perkara menyimpan bukti berharga. Pada 2008, salah seorang tersangka perampokan ditahan untuk tuduhan yang

berbeda. Polisi mengidentifikasi DNA perampok tersebut dan para penyidik mencocokkannya dengan sampel darah yang pada 2001 diambil dari lintah yang ditemukan di tempat kejadian perkara. Ternyata DNA orang itu cocok dengan DNA yang ditemukan dalam lintah, sehingga perampok itu terpaksa mengakui perbuatan yang dilakukan tujuh tahun sebelumnya [114].

## 7.2. Fluoresens Sinar-X

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mendeteksi keberadaan dan mengukur kadar suatu unsur di lingkungan. Untuk mendapatkan hasil pengukuran yang teliti dan bisa dipertanggungjawabkan, beberapa metode pengukuran menghendaki adanya unsur dalam jumlah banyak. Tidak jarang metode itu gagal dalam melakukan pengukuran karena unsur yang akan diidentifikasi ternyata jumlahnya sangat sedikit. Tidak jarang pula beberapa teknik pengukuran memiliki keterbatasan lain, seperti perlu waktu pengukuran lama, preparasi sampel yang cukup rumit, serta tidak mampu melakukan pengukuran multi unsur dalam waktu bersamaan. Berbagai kelemahan itu tentu akan berpengaruh terhadap hasil akhir pengukuran.

Identifikasi berbagai jenis unsur, terutama dalam jumlah sangat kecil, seringkali tidak dapat dilakukan dengan mengandalkan teknik pengukuran konvensional. Beberapa kendala dihadapi para ilmuwan dalam mengidentifikasi unsur-unsur kelumit yang memiliki kadar sangat rendah, bobot sampel yang akan diukur terbatas serta membutuhkan akurasi dan presisi yang tinggi. Karena itu, perlu dikembangkan suatu metode yang dapat mengatasi kendala-kendala teknis itu. Salah satu metode yang telah berhasil dikembangkan dan memberikan solusi terbaik dalam mengidentifikasi unsur-unsur kelumit untuk kondisi saat ini adalah dengan teknik analisis nuklir (TAN) [118]. Teknik ini mengandalkan beberapa metode, terutama analisis aktivasi neutron (AAN), *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *particle induced X-Ray emission* (PIXE).

Setiap atom dapat memancarkan sinar-X karakteristik dengan energi yang berbeda-beda, sehingga pancaran sinar-X karakteristik itu dapat dipakai untuk mengidentifikasi jenis atom yang memancarkannya. Dengan memilih salah satu panjang gelombang, distribusi intensitas sinar-X

karakteristik dapat digunakan untuk pencitraan kandungan berbagai jenis unsur kelumit dalam berbagai jenis sampel [119]. Spektrum energi yang lebih kompleks juga dapat terjadi pada target dari atom-atom tertentu. Jika elektron pada kulit K ( $n=1$ ) yang terpental keluar, maka elektron dari orbit yang lebih tinggi akan mengisi kekosongan orbit K disertai dengan pancaran sederetan garis spektrum yang dinyatakan dalam notasi sinar-X sebagai garis  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ ,  $K_{\gamma}$  dan seterusnya. Jika elektron pada kulit L ( $n=2$ ) yang terpental, maka garis-garis spektrum lainnya yang disebut deret L akan terpancar. Demikian pula jika yang terpental adalah elektron pada kulit M ( $n=3$ ), akan disertai dengan pemancaran yang disebut deret M dan seterusnya.

Metode analisis unsur-unsur dengan mengandalkan pancaran sinar-X karakteristik dikenal dengan nama fluoresens Sinar-X atau *X-Ray Fluorescence* (XRF). Energi foton sinar-X yang diemisikan dari suatu unsur adalah karakteristik untuk masing-masing unsur yang bersangkutan. Sinar-X karakteristik yang terpancar dari unsur itu selanjutnya ditangkap dan dicacah oleh detektor radiasi, biasanya jenis germanium tingkat kemurnian sangat tinggi atau *high pure germanium* (HPGe) yang dihubungkan dengan sistem penganalisisan saluran ganda (MCA). Berdasarkan hasil spektrum energi radiasi yang diperoleh dari proses pencacahan inilah jenis unsur yang dianalisis dapat diidentifikasi. Luas masing-masing spektrum sinar-X proporsional dengan jumlah atom yang terdapat dalam sampel. Teknik XRF juga merupakan teknik analisis multi unsur.

Teknik XRF banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang kegiatan, salah satunya adalah dalam bidang kesehatan untuk analisis mineral-mineral kelumit di dalam tubuh. Sejumlah mineral sangat diperlukan oleh tubuh manusia untuk kesehatan dan pertumbuhan. Secara umum mineral itu memiliki dua fungsi utama, yaitu membangun dan mengatur. Beberapa mineral diperlukan tubuh dalam jumlah relatif besar, lebih dari 100 mg sehari. Mineral kelompok ini disebut makromineral, seperti Ca, P, Na, Cl, K, Mg dan S. Kelompok mineral lainnya disebut mineral perunut atau kelumit yang diperlukan oleh tubuh dalam jumlah sangat sedikit. Dalam tubuh manusia ada 14 unsur kelumit yang termasuk esensial bagi manusia, yaitu: Co, Cr, Cu, F, Fe, I, Mn, Mo, Ni, Se, Si, Sn, V dan Zn [115].

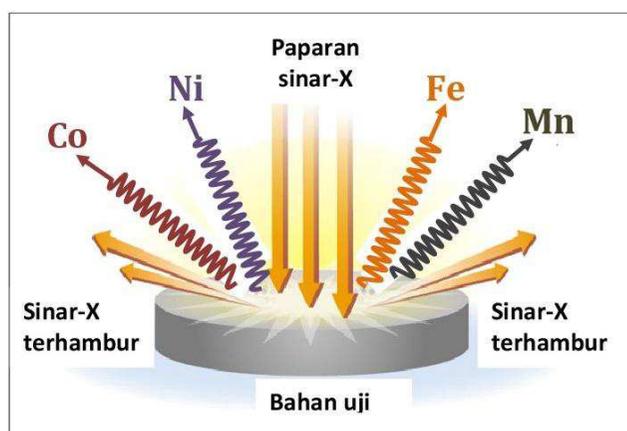
Keberadaan unsur-unsur kelumit penyusun tubuh ternyata sangat sulit untuk dianalisis baik secara kualitatif maupun kuantitatif dengan metode analisis kimia biasa. Teknik analisis konvensional pada umumnya menghendaki adanya unsur dengan jumlah yang relatif banyak agar dapat dianalisis. Seringkali keberadaan unsur-unsur kelumit tidak memenuhi jumlah minimal yang dikehendaki oleh metode konvensional. Karena kendala jumlah ini, maka metode analisis kimia biasanya kurang bisa diandalkan untuk kegiatan ini. Karena kendala itu, maka diperlukan teknik lain yang mampu menganalisis keberadaan unsur-unsur kelumit di dalam tubuh manusia. Teknik nuklir ternyata mampu mengatasi kendala yang dihadapi oleh metode konvensional tersebut. Pemeriksaan unsur kelumit di dalam tubuh manusia dengan teknik nuklir dapat dilakukan baik dengan teknik AAN maupun XRF [119].

Teknik XRF dapat dipakai untuk menentukan kandungan mineral kelumit dalam bahan biologis maupun dalam tubuh secara langsung. Di beberapa negara maju, teknik ini banyak digunakan untuk memeriksa kandungan unsur kelumit I stabil baik yang terdapat dalam kelenjar gondok, darah maupun urine. Iodin diperlukan oleh tubuh dalam jumlah yang sangat kecil, tetapi kelenjar gondok baru akan berfungsi secara normal apabila persediaan I di dalam tubuh cukup memadai. Defisiensi I dalam diet seseorang dapat mengakibatkan pembesaran kelenjar gondok (*goiter*) [120].

Teknik pemeriksaan kandungan I di dalam tubuh dapat dilakukan dengan cara menembakkan radiasi foton elektromagnetik ke sasaran yang diteliti [120]. Sumber radiasi yang sering digunakan adalah radioisotop americium-241 ( $^{241}\text{Am}$ ) dengan radiasi elektromagnetik yang dipancarkan berenergi 60 keV. Radiasi dari  $^{241}\text{Am}$  itu selanjutnya akan berinteraksi dengan sebuah elektron yang berada di kulit K unsur I di dalam tubuh atau bahan biologis lainnya. Karena menyerap energi elektromagnetik, maka elektron yang berada di kulit K atom I akan memiliki energi kinetik yang cukup untuk melepaskan diri dari ikatan inti, sehingga elektron itu akan terpental keluar. Proses lepasnya elektron dari ikatan inti tadi disebut proses pengionan materi oleh radiasi. Kekosongan elektron di kulit K ini selanjutnya akan diisi oleh elektron lainnya yang berada di kulit yang lebih luar, misal kulit L atau kulit M. Perpindahan

elektron ke kulit yang lebih dalam itu akan disertai dengan pancaran radiasi elektromagnetik dengan energi tertentu. Untuk unsur-unsur tertentu, pancaran radiasi elektromagnetik tersebut adalah dalam bentuk sinar-X karakteristik.

Pancaran sinar-X karakteristik ini demikian khasnya untuk masing-masing unsur kelumit di dalam tubuh, sehingga masing-masing unsur itu menghasilkan sinar-X karakteristik yang energinya berbeda-beda bergantung pada jenis unsurnya seperti ditunjukkan pada Gambar 7.2. Di sinilah teknik XRF memiliki kelebihan dalam menganalisis unsur kelumit dalam tubuh dibandingkan dengan teknik analisis lainnya.



Gambar 7.2 Prinsip analisis unsur kelumit dengan teknik XRF [121]

Untuk unsur I, sinar-X karakteristik yang dipancarkannya berenergi 28,5 keV jika kekosongan elektron di kulit K diisi oleh elektron dari kulit L, dan 32,4 keV jika kekosongan itu diisi oleh elektron dari kulit M. Intensitas pancaran sinar-X karakteristik dari unsur I tadi selanjutnya dapat dideteksi dan diukur dengan pemantau radiasi. Hasil pengukuran intensitas sinar-X karakteristik akan setara dengan jumlah unsur I yang terdapat di dalam tubuh atau sampel biologis yang diperiksa. Jadi dengan menganalisis lebih lanjut hasil cacahan radiasi sinar-X karakteristik tadi, dapat diperkirakan jumlah unsur kelumit I di dalam tubuh orang yang diperiksa.

Alih energi dari radiasi kepada materi yang dilaluinya dapat menimbulkan berbagai jejak atau tanggapan tertentu yang dapat diamati. Kuantitas jejak yang timbul akan sebanding dengan jumlah energi radiasi yang dialihkan ke materi. Oleh sebab itu, bahan-bahan yang mampu memperlihatkan gejala tertentu apabila berinteraksi dengan radiasi ini dapat dipakai sebagai pemantau (detektor) radiasi. Salah satu jenis jejak yang dapat timbul dari interaksi itu adalah proses pengionan materi. Pemantau radiasi yang bekerjanya memanfaatkan fenomena pengionan dan paling umum digunakan adalah detektor semikonduktor dari bahan silikon (Si) yang diaktivasi dengan litium (Li) sehingga membentuk detektor semikonduktor Si (Li).

Pengertian pemantau semikonduktor mencakup sekelompok zat padat yang dapat dipakai untuk pemantauan radiasi. Namun pada kenyataannya, hanya kristal Si dan Ge yang memenuhi syarat sebagai pemantau radiasi. Fenomena fisika yang dimanfaatkan dalam proses pemantauan ini adalah terjadinya konduktivitas listrik karena adanya perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi apabila kristal semikonduktor berinteraksi dengan radiasi pengion. Pengumpulan elektron-elektron yang dilepaskan dari proses pengionan oleh radiasi sepanjang jejaknya di dalam zat padat merupakan dasar dari proses kerja pemantau ini.

Pemantau semikonduktor sambungan n-p telah digunakan secara luas untuk pemantauan radiasi yang menghasilkan pengionan dalam jumlah besar. Penggunaan medium padat dengan kerapatan pengionan yang tinggi memberikan banyak keuntungan, karena medium itu dapat dipakai untuk menghentikan partikel berenergi tinggi dan memantau radiasi dengan ionisasi spesifik rendah. Zat padat ini dapat memantau partikel bermuatan yang jangkauannya di dalam zat padat kira-kira 1 mm atau kurang. Energi yang diperlukan untuk pembentukan pulsa listrik pada pemantau semikonduktor sangat kecil dibandingkan dengan pemantau jenis lainnya. Oleh sebab itu, spektrum energi radiasi elektromagnetik yang dihasilkan oleh pemantau semikonduktor ini lebih tajam dibandingkan dengan spektrum yang dihasilkan oleh pemantau jenis lainnya.

Kelebihan lain yang dimiliki oleh pemantau semikonduktor adalah linieritas pada daerah energi yang sangat lebar. Kombinasi dari resolusi yang tinggi serta linieritas yang lebar ini menjadikan pemantau semikonduktor sebagai spektrometer radiasi terbaik jika dikombinasikan dengan instrumen elektronik yang sesuai. Hampir semua spektrometri radiasi elektromagnetik modern dilakukan dengan pemantau semikonduktor. Resolusi energi yang sangat bagus pada pemantau Si(Li) berukuran sangat kecil menjadikan pemantau ini sangat baik untuk digunakan dalam spektrometri sinar-X karakteristik.

Pulsa listrik dari pemantau akan diproses lebih lanjut oleh penguat awal dan peralatan elektronik berupa penganalisisan saluran ganda (*multi channel analyzer, MCA*) sehingga pada layar penganalisis itu dapat ditampilkan spektrum radiasi elektromagnetik yang ditangkap detektor. Data tampilan spektrum radiasi pada layar penganalisis dapat dipakai untuk analisis spektrometri radiasi secara kuantitatif. Analisis kuantitatif dilakukan melalui pengukuran luas daerah di bawah kurva spektrum radiasi elektromagnetik tersebut. Pemantau semikonduktor Si (Li) mempunyai efisiensi yang cukup baik untuk pemantauan radiasi elektromagnetik. Dengan menggabungkan alat pantau tersebut dengan komputer, data masukan akan diproses lebih lanjut sehingga dihasilkan informasi kandungan I di dalam kelenjar gondok maupun bahan biologis lainnya yang diperiksa.

### **7.3. Pengembangan Obat-Obatan**

Sebagaimana dibahas pada bagian 3.4, fasilitas APS yang dibangun dalam rangka mendukung berbagai program penelitian baik dasar maupun terapan di AS, mulai dioperasikan pada 1996. Salah satu fungsi dari fasilitas tersebut adalah untuk penelitian dan pengembangan dalam bidang medis. Fasilitas ini juga diharapkan dapat meningkatkan daya saing AS dalam penguasaan teknologi tinggi, terutama dalam bidang semikonduktor, polimer, farmasi dan katalis, sehingga banyak industri yang tertarik dan ingin berpartisipasi dalam penelitian. Dengan fasilitas APS tadi para peneliti mampu mendapatkan gambaran objek seukuran atom maupun molekul yang jauh lebih detail dibandingkan dengan yang pernah diperoleh para peneliti sebelumnya.

Kuatnya berkas sinar-X yang diproduksi di dalam APS telah membuka pandangan-pandangan baru dalam penelitian sains materi, kimia, fisika, biologi, kedokteran, serta ilmu bumi. Dengan perangkat undulator, para peneliti dapat membuat kilatan fotografi sinar-X terhadap kristal protein hanya dalam waktu  $10^{-9}$  detik. Tanpa undulator, penelitian yang sama memerlukan waktu beberapa hari. Dalam bidang medis, fasilitas APS dapat dipakai untuk mengamati berbagai jenis organ di dalam tubuh manusia dengan hasil sangat akurat, karena mampu memberikan gambar yang lebih rinci dengan resolusi setingkat atom atau molekul, dalam waktu yang sangat cepat. Lebih dari 300 ilmuwan dapat mengumpulkan data penelitian secara bersamaan melalui 100 macam penelitian yang berbeda [122].

Dalam kaitannya dengan penelitian medis, para peneliti di Argonne National Laboratory telah sukses melakukan uji coba pengoperasian detektor sinar-X jenis *charge-coupled device* (CCD). Alat ini dapat memvisualkan hasil diagnosis dengan sinar-X ke dalam bentuk gambar yang dapat langsung diamati melalui layar komputer dengan proses sangat cepat. Selanjutnya dikembangkan pula teknik kristalografi protein, yaitu studi protein dan molekul biologis besar lainnya pada tingkat atom. Fasilitas ini memiliki berbagai aplikasi dalam pencitraan kimia maupun medis.

Detektor CCD mampu merekam 20.500 pengukuran kristal protein dengan sinar-X hanya dalam waktu 36 detik, yang jika dilakukan dengan teknik konvensional memerlukan waktu beberapa hari. Untuk proses angiografi, detektor CCD mampu merekam pencitraan sinar-X dari sebuah jantung dengan hasil gambar yang sangat jelas dan rinci dalam waktu tiga mili detik. Karena itu, dengan detektor CCD dan berkas sinar-X kualitas tinggi, pencitraan jantung dapat dilakukan dengan terimaan dosis radiasi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan teknik pencitraan konvensional lainnya, tanpa memerlukan prosedur medik yang berbelit, serta kemudahan-kemudahan lainnya.

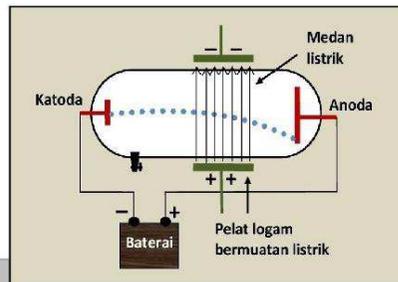
Dengan memanfaatkan sinar-X berenergi ultra tinggi, para peneliti dapat mengenali proses-proses kehidupan secara lebih akurat dan menyeluruh [123]. Pengamatan itu tentu akan memberikan manfaat yang sangat besar bagi dunia biologi dan medis. Kristalografi protein untuk

mempelajari protein dan molekul biologis ukuran besar lainnya dapat dilakukan dengan resolusi tingkat atomik. Hasil pengamatan itu akan bermanfaat bagi bidang kimia maupun medis, misal untuk mengembangkan jenis-jenis obat baru. Binatang bersel satu seperti bakteri dapat dikenali secara lebih akurat sehingga dapat meningkatkan pengetahuan mengenai berbagai jenis penyakit serta cara pengobatannya.

Banyak masalah kesehatan dalam tubuh manusia yang hingga kini belum berhasil dikenali secara tuntas, dan ini merupakan tantangan tersendiri bagi ilmuwan yang berkecimpung dalam dunia medis. Penelitian dan pengembangan masih terus dilakukan untuk menjawab tantangan dan mencari solusi atas permasalahan tersebut. Bagi beberapa negara maju, pencarian solusi untuk permasalahan tadi mendapatkan prioritas dan perhatian yang demikian tinggi.

Banyak fasilitas penelitian dengan sarana yang demikian mahal telah dihadirkan oleh negara-negara maju. Penelitian dan pengembangan dalam bidang medis yang dilakukan dengan fasilitas itu diharapkan dapat mengungkapkan hal-hal baru berkaitan dengan masalah medis yang selama ini masih penuh misteri, seperti mengenali berbagai jenis penyakit yang hingga kini belum bisa ditangani secara tuntas karena belum ada obatnya. Dengan terbukanya misteri itu, tidak tertutup kemungkinan akan segera diikuti pula oleh penemuan jenis obat baru untuk penyembuhannya. Dengan demikian, penelitian itu akan memberikan manfaat yang besar bagi dunia medis dalam rangka meningkatkan taraf kesehatan masyarakat dunia.

# 8



## PENUTUP

Penelitian yang mengantarkan kepada penemuan sinar-X bukanlah penelitian yang berdiri sendiri, melainkan merupakan proses yang telah berjalan sangat panjang dan melibatkan banyak ilmuwan sebelumnya. Sejarah penemuan sinar-X tidak bisa terlepas dari penelitian lucutan bunga api listrik dalam medium gas. Penelitian itu dilandasi oleh keingintahuan para ilmuwan pertengahan abad ke-19 mengenai pengaruh kelistrikan pada gas. Dari kegiatan ini para peneliti mengamati kemunculan sinar yang mengalir dari katoda menuju anoda di dalam sebuah tabung lucutan. Dalam perkembangan berikutnya, tabung lucutan gas yang digunakan untuk penelitian itu disebut tabung sinar katoda, sedang sinar yang keluar dari katoda disebut sebagai sinar katoda.

Beberapa ilmuwan telah merintis jalan dan mengungkap misteri tentang karakteristik sinar katoda. Wilhelm C. Roentgen merupakan salah satu ilmuwan pembawa tongkat estafet dalam penelitian di bidang itu hingga mengantarkannya kepada penemuan sinar-X pada tanggal 8 November 1895. Penemuan sinar ini akhirnya dicatat sebagai bagian dari perkembangan teknologi di bidang fisika. Atas jasanya itu, berbagai penghargaan internasional diterima oleh Roentgen dari beberapa negara. Ia juga berhasil memosisikan dirinya sebagai ilmuwan yang disegani. Penghargaan ilmiah tertinggi datang dari Komite Nobel di Stockholm yang

menganugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada tahun 1901. Hadiah itu diterima saat usianya menginjak 50 tahun.

Hampir setiap orang mengetahui atau paling tidak pernah mendengar tentang pemeriksaan kesehatan atau pemotretan bagian-bagian dalam tubuh manusia dengan sinar-X atau sinar Roentgen. Untuk tujuan medik, tubuh manusia yang pada prinsipnya dapat dibedakan baik secara anatomi maupun fisiologi, pada mulanya merupakan objek yang tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata. Namun dengan ditemukannya sinar-X, tubuh manusia ternyata dapat diubah menjadi objek yang transparan. Sinar-X mampu membedakan kerapatan dari berbagai jaringan dalam tubuh manusia yang dilewatinya.

Pemanfaatan sinar-X dalam bidang kedokteran untuk keperluan diagnosis sudah dikenal secara luas baik oleh para praktisi kesehatan maupun masyarakat umum. Dengan bantuan sinar-X, informasi mengenai kondisi dalam tubuh manusia menjadi mudah diperoleh tanpa perlu melakukan operasi bedah. Dokter bisa lebih mudah mendeteksi kelainan-kelainan di dalam tubuh pasien. Banyak kasus yang memerlukan penanganan secara medis baru bisa ditangani setelah didiagnosis dengan Sinar-X.

Pada perkembangan berikutnya, sinar-X ternyata juga memainkan peran penting dalam mengatasi masalah kanker dunia. Perkembangan teknologi telah mengantarkan ke pemanfaatan sinar-X untuk keperluan radioterapi, dan kegiatannya lebih populer dengan nama onkologi radiasi. Peningkatan keberhasilan dalam kegiatan ini didukung oleh peningkatan unjuk kerja sumber radiasi yang digunakan, seperti dirintisnya penggunaan akselerator sebagai alat pembangkit sinar-X energi tinggi. Perkembangan dalam teknologi akselerator telah memberikan jalan diaplikasikannya sinar-X untuk radioterapi kanker dengan hasil yang cukup memuaskan. Banyak kasus penyakit kanker berhasil disembuhkan dengan teknik radioterapi menggunakan sinar-X yang dibangkitkan dengan akselerator.

Peran sinar-X dalam dunia kesehatan ternyata tidak berhenti hanya pada kegiatan radiodiagnosis dan radioterapi saja. Teknologi yang berkaitan dengan sinar-X masih terus mengalami peningkatan dan penyempurnaan. Studi secara intensif oleh para pakar pada giliran berikutnya telah mengantarkan ke arah penemuan pemanfaatan yang lain

dari sinar-X. Pengenalan yang baik tentang karakteristik fisika sinar-X, didukung dengan penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi fisika nuklir, didukung pula oleh peningkatan kemampuan teknik dalam pemantauan radiasi, akhirnya mengantarkan para ilmuwan ke arah pemanfaatan sinar-X karakteristik untuk penelitian medis. Perkembangan mutakhir dalam pemanfaatan sinar-X ini tentu memiliki arti sangat besar dalam upaya meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan kepada masyarakat luas.

Banyak masalah medis yang hingga kini belum berhasil dikenali secara tuntas, sehingga menjadi tantangan tersendiri bagi mereka yang berkecimpung dalam dunia kesehatan. Penelitian dengan memanfaatkan sinar-X berenergi ultra tinggi masih terus dilakukan untuk menjawab tantangan dan mencari solusi atas permasalahan tersebut. Hasil penelitian itu akan bermanfaat bagi bidang kimia maupun medik, misal untuk mengembangkan jenis-jenis obat baru. Binatang bersel satu seperti bakteri dapat dikenali secara lebih detail sehingga dapat meningkatkan pengetahuan mengenai berbagai jenis penyakit dan pengobatannya. Ada harapan para peneliti kelak berhasil mengungkap masalah medis yang selama ini masih penuh misteri, seperti mengenali berbagai jenis penyakit yang hingga kini belum bisa ditangani secara tuntas karena belum ada obatnya. Dengan terbukanya misteri itu, tak tertutup kemungkinan segera diikuti pula oleh penemuan jenis obat baru untuk penyembuhannya.

Begitu besar peran penting yang dimainkan sinar-X dalam bidang kesehatan dari sejak masa awal ditemukan, peningkatan peran pada saat ini, hingga peran yang akan dimainkannya di masa-masa yang akan datang. Karya besar ini adalah buah dari keberhasilan para ilmuwan dalam mengungkap hakikat sinar-X. Satu demi satu karakteristik fisika sinar-X berhasil dipelajari, mulai dari fenomena fisika yang mendasari proses terbentuknya sinar-X, perilaku sinar-X sebagai gelombang elektromagnetik, serta sifatnya sebagai radiasi pengion. Pengungkapan berbagai karakteristik fisika sinar-X oleh para ilmuwan pasca Roentgen telah mengantarkan kepada pemahaman yang baik terhadap hakikat sinar-X. Dengan pemahaman yang baik itu memungkinkan manusia mendapatkan jalan untuk memanfaatkan sinar-X dalam bidang kesehatan untuk berbagai keperluan.

Ada begitu banyak manfaat yang dapat diperoleh umat manusia dari penemuan sinar-X oleh Roentgen. Inovasi-inovasi baru di bidang teknologi masih terus dikembangkan sehingga pemanfaatan sinar-X akan semakin luas, menjangkau lebih banyak bidang kehidupan. Banyak kasus maupun permasalahan-permasalahan teknis yang ditemui dalam kehidupan ini berhasil ditangani dengan baik atas jasa sinar-X. Tidak tertutup kemungkinan masih adanya rahasia-rahasia lain yang belum terungkap dari sinar-X. Karena itu, peran besar mungkin masih akan dimainkan oleh sinar-X dalam kehidupan manusia dimasa yang akan datang.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Balchin, J. 2012. *Quantum leaps, 100 Ilmuwan Besar Paling Berpengaruh di Dunia*. Jakarta Selatan 12520: Ufuk Press.
2. Young, H. D., Freedman R. A. 1998. *University physics. 9<sup>th</sup> ed.* New York: Addison-Wesley Publishing Company.
3. Wospakrik, H. J. 2005. *Dari Atomos Hingga Quark*. Jakarta 12210: Penerbit Universitas Atma Jaya/Kepustakaan Populer Gramedia.
4. Patel, SB. 2006. *Physics: An Introduction*. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers.
5. Taylor, J. R., Zafiratos C. D. 1991. *Modern physics for scientist and engineers*. New Yersey: Prentice Hall.
6. Wilopo, AC, editor. *Seabad pemenang hadiah nobel fisika*. Jakarta: Abdi Tandur; 2002.
7. Bertulani, C. A. 2007. *Nuclear physics in a nutshell*. New Jersey 08540: Princeton University Press.
8. Merrick, H. "Sinar-X". Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. 1997. *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 10*. Jakarta: Grolier International/P.T. Widyadara, hal. 144-151.
9. Groth, S. 2000. Lasting benefits, nuclear application in health care. *IAEA Bulletin*, Vol. 42 (1): 33-40.
10. Solana, F. 2008. *Temuan Penting Teknologi Kedokteran*. Yogyakarta: Pustaka Book Publisher.
11. Pickover, C. A. 2008. *Archimedes To Hawking: Laws Of Science And The Great Mind Behind Them*. New York: Oxford University Press.
12. Walecka, J. D. 2008. *Introduction To Modern Physics: Theoretical Foundations*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
13. Gautreau, R., Savin W. 1995. *Fisika Modern*. Terjemahan oleh Hans J. Wospakirk. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga.
14. Chember, H., Johnson T. E. 2009. *Introduction Of Health Physics*. 4<sup>th</sup> ed. New York: Pergamon Press.
15. Wong, S. M. 1999. *Introductory Nuclear Physics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley & Sons.

16. Raymond, A. S., Clement J. M., Moyer C. A. 2005. *Modern Physics*. 3<sup>rd</sup> edition. Victoria 3006: Thomson Learning Inc.
17. Krane, K. S. 1992. *Fisika Modern*. Terjemahan oleh HJ Wospakrik & S Niksolihin. Salemba 4, Jakarta 10430: Penerbit Universitas Indonesia.
18. Martin, A., Harbinson SA. 1986. *An Introduction To Radiation Protection*. 3<sup>rd</sup> ed. London: Chapman and Hall.
19. Singh, R. B. 2002. *Introduction To Modern Physics*. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers.
20. Jelley, N. A. 2007. *Fundamental Of Nuclear Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
21. Morrison, J. C. 2015. *Modern Physics For Scientist And Engineers*. 2<sup>nd</sup> edition. London: Elsevier.
22. Alonso, M., Finn E. J. 1980. *Fundamental University Physics Volume II*. London: Addison-Wesley Publishing Company.
23. Kaplan, I. 1982. *Nuclear Physics*. 2<sup>nd</sup> ed. London: Addison-Wesley Publishing Company.
24. Sproull, RL, Phillips WA. 2015. *Modern Physics, The Quantum Physics Of Atom, Solid And Nuclei*. 3<sup>rd</sup> edition. New York: Denver Publication Inc.
25. Stokley, J. 1997. Radiasi elektromagnetik. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. *Ilmu Pengetahuan Populer* Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; hal. 54-61.
26. Halliday, D, Resnic R. 1990. *Fisika Modern*. Alih bahasa oleh P. Silaban. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga.
27. Aruldhas, G., Rajagopal P. 2005. *Modern Physics*. Delhi: PHI Learning Private Limited.
28. Isaris, R. 2002. *Instrumentasi Nuklir Dan Perannya Dalam Diagnostik Kedokteran Nuklir*. Pidato Pengukuhan Alhi Peneliti Utama Bidang Fisika. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional, Pusat Manajemen dan Bina Industri.
29. International Atomic Energy Agency. 2001. *Building Competence In Radiation Protection And The Safe Use Of Radiation Sources*. Vienna: IAEA.

30. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2009. *Perka BAPETEN tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional*. Jakarta: BAPETEN.
31. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2007. *Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2007 Tentang Keselamatan Radiasi Pengion Dan Keamanan Sumber Radioaktif*. Jakarta: BAPETEN.
32. American Association of Physicists in Medicine. 1998. *Managing The Use Of Fluoroscopy In Medical Institutions*. Medical Physics Publishing: AAPM Report No. 58.
33. U.S. Army Medical Department Center and School. *Dental Radiography*. Sub Course MD0512. Texas: Fort Sam Houston.
34. Lee C. 2001. *Radiation Protection For Staff Involved In Fluoroscopy Procedures, Notes Prepared For Gastroenterological Society Of Australia*. New South Wales: Westmead Hospital, Medical Physics Dept.
35. NHANES III. 1989. *Bone Densitometry Manual*. Maryland: Westat Inc.
36. Sidabutar S. 2012. *Kontrol Kualitas Sistem Mamografi Digital: Direct Radiography (DR)*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia, FMIPA Program Sudi Fisika.
37. Miksik L. *Basic Principles Of Computed Tomography*. Tersedia di: [https://www.lf2.cuni.cz/files/page/files/2014/basic\\_principles\\_of\\_ct.pdf](https://www.lf2.cuni.cz/files/page/files/2014/basic_principles_of_ct.pdf). Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
38. Livingstone MS. 1997. Penghancur atom. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 10*. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara.
39. Sharma S. 2008. *Atomic And Nuclear Physics*. Delhi: Pearson Education.
40. Susworo R, Subkhi MIR, Nasuha. 1997. *Perkembangan dan Aplikasi Teknologi Akselerator untuk Radioterapi*. Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan V PSPKR-BATAN. Jakarta.
41. Argonne National Laboratory. *Frontiers research highlights 1996-1997*. Illinois 60439: University of Chicago; 9700 South Cass Avenue; Argonne.

42. JAERI. 1997. *Persistent Quest: Research Activity 1997*. Tokyo 100-0011: Chiyoda-ku.
43. Wiharto, K. 1996. *Kedokteran Nuklir dan Aplikasi Teknik Nuklir dalam Kedokteran*. Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan. Jakarta: PSPKR-BATAN.
44. Susworo, R. 2007. *Perkembangan Ilmu Radiologi: Diagnostik (Imejing); Terapi (Onkologi Radiasi); Kedokteran Nuklir*. Makalah dipresentasikan pada Seminar Nasional Persatuan Ahli Radiografi Indonesia. Denpasar-Bali.
45. Nasukha. Pencitraan Medik: Sains dan Teknologi Kedokteran untuk Diagnosis. *Warta*; Th IV (9): 32-35.
46. Wiharto, K. Penerapan Teknik Nuklir dalam Kedokteran. *Buletin BATAN*; Tahun ke XII (2): 1-9.
47. VVT Impulse. *X-Ray imaging to new heights*. Tersedia di: <https://www.vvtresearch.com/Impulse/Pages/X-ray-imaging-to-new-heights.aspx>. Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
48. Encyclopedia Britannica. *Contrast Medium*. Tersedia di: <https://www.britannica.com/science/contrast-medium>. Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
49. Bontrager, K. L., Lampignano JP. 2010. *Textbook Of Radiographic Positioning And Related Anatomy*. Seventh edition. St. Louis: Mosby Elsevier.
50. Billjudika, R. R, Sucandra IMAK. 2016. *Tatalaksana Anestesia Dan Reanimasi Pada Pasien Pediatrik*. Denpasar: RSUP Sanglah/FK Universitas Udayana.
51. *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Pemantauan Pertumbuhan, Perkembangan, Dan Gangguan Tumbuh Kembang Anak*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 23 September 2014.
52. Biatecki, M. *Pediatric Radiology*. Tersedia di: [https://www.cm.umk.pl/en/images/learning\\_materials/radiology/Pediatric\\_radiology\\_short.pdf](https://www.cm.umk.pl/en/images/learning_materials/radiology/Pediatric_radiology_short.pdf). Dikunjungi: 02 September 2019.
53. Learning Radiology. *Eosinophilic Granuloma Of Skull*. Tersedia di: <http://learningradiology.com/archives2008/COW%20323->

- EG%20of%20skull/egskullcorrect.htm. Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
54. Malik, I. 2008. *Kesehatan Gigi Dan Mulut*. Bandung: Universitas Padjadjaran; Fakultas Kedokteran Gigi.
  55. Pusat Data dan Informasi Kementerian Kesehatan RI. 2014. *Situasi Kesehatan Gigi Dan Mulut*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
  56. Eric, W. 2002. *Essentials Of Dental Radiography And Radiology*. London: Churchill Livingstone.
  57. Moulton, D. *Dental X-Rays*. Tersedia di: <https://saltscapes.com/living-healthy/2654-dental-x-rays.html>. Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
  58. Cantatore, A, Muller P. 2011. *Introduction To Computed Tomography*. Kopenhagen: Technical University of Denmark.
  59. Cedars-Sinai. *CT Scan Of The Head/Brain*. Tersedia di: <https://www.cedars-sinai.edu/Patients/Programs-and-Services/Imaging-Center/For-Patients/Exams-by-Procedure/CT-Scans/Head/>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
  60. ALODOKTER. *Melacak Penyakit Dengan CT Scan*. Tersedia di: <https://www.alodokter.com/melacak-penyakit-dengan-ct-scan>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
  61. DosenBiologi.com. *Sistem Rangka Manusia: Fungsi Dan Contohnya*. Tersedia di: <https://dosenbiologi.com/manusia/sistem-rangka-manusia>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
  62. Pusat Data dan Informasi Kementerian Kesehatan RI. 2015. *Data & Kondisi Penyakit Osteoporosis di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
  63. Markus, P. S., Unang S., Ratri D. A. 2010. *Deteksi Penyakit Tulang Osteopenia dan Osteoporosis Menggunakan Metode Threshold Otsu*. Jakarta: Universitas Telkom.
  64. Alex, C. *Skeletal System*. Tersedia di: <http://www.alexcanazei.yoga/2013/08/08/bones/>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
  65. RadiologyInfo.org. *Bone Densitometry (DEXA, DXA)*. Tersedia di: <https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=dexa>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.

66. International Atomic Energy Agency. 2010. *Dual Energy X Ray Absorptiometry For Bone Mineral Density And Body Composition Assessment*. IAEA Human Health Series No. 15. Vienna: IAEA.
67. Pusat Data dan Informasi Kementerian Kesehatan RI. 2016. *Bulan Peduli Kanker Payudara*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
68. Komite Penanggulangan Kanker Nasional. *Panduan Penatalaksanaan Kanker Payudara*. Jakarta: Kemeterian Kesehatan Republik Indonesia.
69. WHO. 2007. *Prevention, Cancer Control: Knowledge Into Action: WHO Guide For Effective Programmes*, module 2. Geneva: World Health Organization.
70. -. 2016. *Buletin Jendela Data dan Informasi Kesehatan*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
71. Imaging Technology News. *Mammography Screening Intervals May Affect Breast Cancer Prognosis*. Tersedia di: <https://www.itnonline.com/content/mammography-screening-intervals-may-affect-breast-cancer-prognosis>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
72. Ferry, S., Djoko S, I Putu S. *Perekayasaan Pesawat Sinar-X Fluoroscopy Berbasis Layar Pendar*. PRIMA; Juni 2011; 8(1): 22-27.
73. Medical Expo. *Philips Health Care Product*. Tersedia di: <https://www.medicalexpo.com/prod/philips-healthcare/product-70721-574081.html>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
74. ALODOKTER. *Kenali Apa Itu Fluoroskopi*. Tersedia di: <https://www.alodokter.com/kenali-apa-itu-fluoroskopi>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
75. Chalik, R. *Anatomi Fisiologi Manusia*. Modul bahan ajar cetak farmasi. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; Desember 2016.
76. Isnati. 2012. *Kesehatan Modern Dengan Nuansa Budaya*. J. Kesehatan Masyarakat Universitas Andalas, 7(1): 39-44.
77. Patrick, M. C., David EP, Christopher MS, Joseph M, Eric CP. 2004. *Minimally Invasive Surgical Practice: A Survey Of General Surgeons In Ontario*. Canada: Canadian Medical Association.

78. BSIR. 2013. *Defining And Developing The Interventional Radiology Workforce*. London: British Society of Interventional Radiology.
79. Richard, A., Baum, M. D., Stanley, B. 2014. *Interventional Radiology: A Half Century Of Innovation*. Radiology; 273(2): 75-91.
80. DOCPLAYER. *Ct Coronar Angografi*. Tersedia di: <https://docplayer.me/60603838-Ct-koronar-angiografi-kurs-i-koronarsykdrom-og-hjertesvikt-anders-tjellaug-braten.html>. Dikunjungi: 03 Oktober 2019.
81. Wardhani, S. R. *Biopsi Dalam Bidang Dermatologi*. JKM; Juli 2005; 5(2): 14-22.
82. Schochet, P. N. *Evaluates Child Lung Disease With Bronchoscope*. Tersedia di: <https://www.pedilung.com/pulmonary-tests-procedures/flexible-bronchoscopy/flexible-bronchoscopy-and-biopsy-of-lung/>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
83. ALODOKTER. *Cari Tahu Penyebab Ketidaknormalan Tubuh Dengan Biopsi*. Tersedia di: <https://www.alodokter.com/cari-tahu-penyebab-ketidaknormalan-tubuh-dengan-biopsi>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
84. Underwood, P. L. 2004. *Patologi Umum Dan Sistematis*. Jakarta: Penerbit EGC.
85. Aswadab, Bualkar A., Dahlang T. 2018. Studi Quality Control (QC) Pesawat Fluoroscopy (Angiografi) di PT. Siloam Internasional Hospital Makassar Menggunakan Multimeter RaySafe (X2) dan Black Piranha RTI. *POSITRON*; 8(2): 25-30.
86. Pride Veterinary Centre. *Interventional Radiology & Endoscopy*. Tersedia di: <https://www.prideveterinarycentre.co.uk/interventional-radiology.aspx>. Dikunjungi: 02 Oktober 2019.
87. National Cancer Institute. 2005. *Interventional Fluoroscopy: Reducing Radiation Risks For Patients And Staff*. *The Society Of Interventional Radiology: NIH Publication No. 05-5286*; March.
88. Asikin, M., Nuralamsyah M, Susaldi. 2008. *Sistem Kardiovaskular*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
89. Griadhi IPA. 2016. *Diktat Kuliah Sistem Kardiovaskuler*. Denpasar: Fakultas Kedokteran Universitas Udayana.

90. *Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Penyakit Jantung Penyebab Kematian Tertinggi, Kemenkes Ingatkan Cerdik.* Tersedia di: <http://www.depkes.go.id/pdf.php?id=17073100005>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
91. Pusat Data dan Informasi Kementerian Kesehatan RI. 2014. *Situasi Kesehatan Jantung.* Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
92. ALODOKTER. *Angioplasti, Penyelamat Nyawa Pengidap Sakit Jantung.* Tersedia di: <https://www.alodokter.com/angioplasti-penyelamat-nyawa-pengidap-sakit-jantung>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
93. Amazine.co - Online Popular Knowledge. *Solusi Penyempitan Arteri: Memahami 4 Jenis Angioplasty.* Tersedia di: <https://www.amazine.co/17902/solusi-penyempitan-arteri-memahami-4-jenis-angioplasty/>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
94. Dokter Sehat. *Operasi Bedah Jantung: Tujuan, Jenis, Dan Biaya.* Tersedia di: <https://doktersehat.com/bedah-jantung/>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
95. Wicaksono, S. H., dkk. 2017. *Pedoman Interpretasi Dan Pelaporan Angiografi Koroner Dengan Tomografi Computer.* Edisi pertama. Jakarta: Perhimpunan Dokter Spesialis Kardiovaskular Indonesia.
96. Munawar, M., dkk. 2018. *Pedoman Laboratorium Kateterisasi Jantung Dan Pembuluh Darah.* Jakarta: Perhimpunan Dokter Spesialis Kardiovaskular Indonesia.
97. Radiology Info. *Cerebral Angiography.* Tersedia di: <https://www.radiologyinfo.org/en/pdf/angiocerebral.pdf>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
98. Radiopaedia. *Cerebral Angiography.* Tersedia di: <https://radiopaedia.org/articles/cerebral-angiography?lang=us>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
99. John Hopkins Hospital. *Cerebral Angiography.* Tersedia di: [https://www.hopkinsmedicine.org/interventional\\_neuroradiology/downloads/cerebral-angiography-johns-hopkins-web.pdf](https://www.hopkinsmedicine.org/interventional_neuroradiology/downloads/cerebral-angiography-johns-hopkins-web.pdf). Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
100. N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. *Interventional Diagnostics.* Tersedia di: <https://omr.by/diagnostics-of-oncological->

- diseases/vse-vidy-interventional-diagnostics/interventional-diagnostics. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
101. Nafiah, A. 2007. *Emboli Paru*. Medan: Fakultas Kedokteran USU.
  102. -. 1993. *State Of Progress Of Comprehensive 10 Year Strategy For Cancer Control*. Science and Technology in Japan, Vol. 12(47): pp. 40-41.
  103. Babbar, A. *What Is Eye Cancer?* Tersedia di: <https://blog.digitexmedical.com/2014/03/12/what-is-eye-cancer/>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
  104. Bernard, W. S., Christopher PW (editor). 2014. *World Cancer Report 2014*. Lyon: International Agency for Research on Cancer.
  105. Perry, M. C. 2011. *Approach To The Patient With Cancer*. In: Goldman L, Schafer AI, eds. Cecil Medicine. 24th ed. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier.
  106. Birch, B., Marie Curie (alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo), 1993. PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
  107. International Atomic Energy Agency. 2010. Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students. *Training Course Series No. 42*. Vienna: IAEA.
  108. CARTI. *Radiation Oncology*. Tersedia di: <https://www.carti.com/treatments/radiation-oncology/>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
  109. Gondhowiardjo, S. 2003. Brakhiterapi dalam terapi kanker anorektal. *Makara, KESEHATAN*; Desember; 7(2): 63-66.
  110. Fitriatuzzakiyyah, N., Sinuraya, R. K., Puspitasari, I. M. 2017. Terapi kanker dengan radiasi: konsep dasar radioterapi dan perkembangannya di Indonesia. *Jurnal Farmasi Klinik Indonesia*, 6(4): 311–320.
  111. Ajay, Niranjana A., dkk. *Gamma Knife Radiosurgery: Current Technique*. Tersedia di: [https://www.wfns.org/WFNSSData/Document/ClinicalResources/Gamma\\_Knife\\_Radiosurgery.pdf](https://www.wfns.org/WFNSSData/Document/ClinicalResources/Gamma_Knife_Radiosurgery.pdf). Dikunjungi: 04 Oktober 2019.
  112. Neurosurgical Medical Clinic. *Gamma Knife Radiosurgery For Tumor*. Tersedia di: <http://www.sd-neurosurgeon.com/gamma-knife-radiosurgery-tumor.php>. Dikunjungi: 04 Oktober 2019.

113. Zeman, E. M., Schreiber E. C., Tepper J. E. 2013. *Basics Of Radiation Therapy*. In: Niederhuber JE, Armitage JO, Doroshow JH, Kastan MB, Tepper JE, eds. Niederhuber: Abeloff's Clinical Oncology. 5th ed. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier.
114. Akhadi, M. 2006. *Analisis Unsur Kelumit Melalui Pancaran Sinar-X Karakteristik*. Buletin Alara, 8(1): 11-19.
115. Damon, G. E. 1997. *Peranan Karbohidrat, Lemak Dan Mineral*. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 7. Jakarta: Grolier International Inc./PT Widyadara.
116. Owen, D. 2000. *Hidden Evidence, Forty True Crimes And How Forensic Science Helped Solve Them*. Singapore: Berkeley Books Pte Ltd.
117. Akhadi, M. 2016. *Mendeteksi Lukisan Palsu Dengan Menggunakan Teknik Nuklir*. Buletin Alara, 8(2): 89-98.
118. Rukihati. 2007. *Analisis Aktivasi Nuklir Untuk Studi Pencemaran Lingkungan Hidup*. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Kimia. Serpong: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
119. Muhayatun. 2013. *Teknik Analisis Nuklir Dalam Peningkatan Kemampuan Identifikasi Sumber Pencemar Udara Di Indonesia*. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Ilmu-ilmu Kimia Lainnya. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
120. Akhadi, M. 2002. Pancaran sinar-X karakteristik untuk pemeriksaan medis. *J. Kedokteran Dan Farmasi Medika*; Juli; tahun ke XXVIII (7): 467-470.
121. Cohen, B. L. 1982. *Concept Of Nuclear Physics*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.
122. Akhadi, M. 2007. *Teknologi Pembangkit Sinar-X: Dari Tabung Sinar Katoda Ke Spring-8 Dan APS*. Bulletin Alara, 8(3): 155-164.
123. Akhadi, M. 2005. Penelitian medik dengan sinar-X energi ultra tinggi. *J. Kedokteran Dan Farmasi Medika*, tahun ke XXXI (6): 387-391.

# INDEKS

## A

akselerator, 44, 45, 46, 47, 48, 145  
akselerator Cockcroft-Walton, 45  
akselerator linier, 46  
akselerator magnetik, 45, 46, 47  
angiografi, 10, 86, 87, 88, 95, 103, 104, 106, 107, 108, 110, 142, 154  
angiografi ginjal, x, 109  
angiografi pulmonal, 110  
angiogram, 87  
angiography cerebral, 107  
angioplasti, 89, 102, 109, 155  
anoda, 2, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 81, 144  
APS, ix, 48, 49, 141, 142, 157  
Argonne National Laboratory, 48, 142, 150  
aritmia, 101  
arteriografi, 90  
atherosclerosis, 104, 105

## B

bahan fluoresens, 3  
barium platinosianida, 3, 17, 37  
Barkla, Charles G., 17, 26  
bedah invasif minimal, 84, 85  
betatron, 45, 46  
biopsi, 10, 51, 68, 75, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 154  
Bohr, Niels Henrik, 25  
bone densitometry, 43  
brakiterapi, 124  
Bremsstrahlung, vii, ix, 11, 14, 15, 16, 24, 28, 32, 131

## C

calcium, 37, 54

carcinoma, 112  
C-Arm, 43, 85, 97, 106  
CHD, 89  
cinefluorografi, 85  
Cockcroft, John D., 45  
Coolidge, William David, 37  
Coronary angiography, 105, 106  
Crookes, Sir William, 2, 35  
CT-Scan, 9, 40, 44, 65, 152  
CXR, 53

## D

diagnostik, 9, 10, 40, 41, 43, 51, 52, 54, 58, 77, 78, 84, 85, 87, 91, 103, 115  
difraksi, 17, 18  
difraktometri, 42  
Dotter, Charles T., 85  
DXA, 73, 74, 152

## E

Edison, Thomas Alva, 7, 37  
ekstra oral, 63, 64  
elektromagnetik, 4, 8, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 24, 26, 30, 31, 33, 138, 140, 141, 146, 149  
elektron, 2, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 81, 122, 124, 131, 137, 138, 139, 140  
elektron orbital, 22, 24, 29, 30  
embolisasi, 87, 88

## F

faktor risiko, 76, 78, 114  
Faraday, Michael, 1

fase M, 120  
filamen, 35, 36, 37, 38, 39, 44, 45, 46  
fluoroscopi, ix, 9, 10, 40, 42, 43, 79, 80, 81, 82, 85, 87, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 103, 109, 153  
fluoroscopi intervensional, 10, 43, 85, 103  
fluoroscopi konvensional, 43, 98, 99  
foton, 8, 12, 15, 29, 31, 33, 39, 43, 81, 122, 124, 137, 138

## G

gagal jantung, 53, 101  
gastroenterologi, 95  
gastrointestinal, 10, 95  
gastrostomy, 89  
gelombang elektromagnetik, 4, 7, 8, 14, 18, 20, 21, 24, 26, 31, 146  
Grimaldi, Francesco, 17

## H

Hittorf, Johann W., 2  
hydrocephalus, ix, 61

## I

IMRT, 126  
intervensional, x, 10, 40, 43, 51, 84, 85, 95, 96, 102, 103  
inti atom, 15, 16, 22, 24, 25, 28, 44, 47, 122, 131  
intra oral, 63, 64  
invasif, 68, 84, 85, 93  
ion, 23, 124  
IR, 85, 86, 87, 90, 94, 95, 102, 103

## J

JAERI, 49, 151, 162  
jantung, 10, 40, 52, 53, 61, 68, 69, 80, 82, 83, 86, 87, 88, 89, 90, 95, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 119, 142, 155

jantung koroner, 68, 83, 89, 100, 102, 103, 104, 105, 106  
jantung *rupture*, 101

## K

kalsium, 69, 70, 71, 72  
kanker, ix, x, 8, 9, 10, 11, 41, 42, 47, 52, 68, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 88, 90, 92, 94, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 130, 145, 156  
kanker payudara, ix, 9, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 94, 114, 116  
kardiogenik, 101  
kardiovaskuler, 95, 100  
kateterisasi, 86, 87, 107  
katoda, 1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 17, 27, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 81, 144  
kedokteran nuklir, 52, 118, 119  
kemoterapi, 10, 75, 89, 90, 94, 115, 116, 117, 118, 121, 122, 128, 130  
kolesterol, 52, 100, 104, 105  
konvensional, 42, 43, 51, 64, 67, 81, 85, 98, 99, 120, 129, 136, 138, 142  
kristalografi, 42, 142

## L

Laue, Max von, 18  
leukemia, 113, 121  
limfoma, 113, 121  
LINAC, 46, 47, 48  
Ludwig, Anna Bertha, 5

## M

makronutrien, 133  
mamografi, ix, 40, 43, 76, 77, 78, 79, 92  
medium kontras, ix, 9, 55, 56, 68  
mieloma, 113  
mikronutrien, 132, 133  
modalitas, 52, 116

model atom, 24, 25, 26  
Moseley, Henry, 131  
MRI, 51, 78  
multimodalitas, 116

## N

Nobel Fisika, 6  
nomor atom, Z, 16, 56

## O

onkologi, 8, 10, 111, 112, 115, 118,  
120, 125, 131, 145  
onkologi bedah, 116  
onkologi medis, 116  
onkologi radiasi, 8, 10, 111, 112, 118,  
120, 125, 131, 145  
orbit, 22, 28, 29, 30, 131, 137  
ortopedi, 95  
osteoporosis, 9, 70, 71, 72, 73, 74

## P

pediatrik, 58, 59, 151  
pemindai CT, 65, 66, 67, 68  
pengion, x, 8, 10, 14, 21, 22, 24, 51,  
52, 77, 97, 112, 114, 118, 121, 123,  
124, 140, 146  
photon absorptiometry, 73  
pisau gamma, x, 124, 126, 127, 128,  
129  
pisau sinar-X, 11, 124  
plak, 100, 102, 105, 108  
positron, 48, 49  
proton, 44, 45, 47, 124

## R

radiasi elektromagnetik, 8, 21, 30, 138,  
140, 141  
radiasi gamma, 128  
radiasi non-pengion, 22

radiasi pengion, x, 8, 10, 14, 21, 22,  
24, 52, 53, 77, 97, 114, 118, 121,  
123, 124, 140, 146  
radiator bersirip, 39  
radiodiagnostik, 7, 8, 37, 40, 41, 42,  
52, 55, 57, 58  
radiografi anak, 9, 40, 58  
radiografi gigi, 9, 40, 42, 62, 63, 64  
radiografi industri, 42  
radiografi intervensional, 10, 40  
radiografi medis, 42  
radiografi umum, 9, 40, 52  
radioisotop, 67, 118, 119, 124, 125,  
138  
radiologi intervensional, 9, 10, 51, 84,  
85  
radiosurgery, 127, 156  
radioterapi, v, x, 8, 11, 41, 42, 45, 47,  
52, 111, 112, 115, 116, 117, 118,  
119, 121, 123, 124, 125, 126, 128,  
145, 156  
Roentgen, Wilhelm Conrad, v, 2

## S

sarkoma, 113  
semikonduktor, 140, 141  
siklotron, 45, 119  
sinar gamma, 21, 125  
sinar katoda, 1, 2, 3, 4, 5, 14, 17, 27,  
34, 35, 39, 144  
sinar-X karakteristik, ix, 8, 11, 27, 28,  
30, 131, 132, 136, 137, 139, 141,  
146, 157  
spektrum elektromagnetik, 20, 21  
Spring-8, 49, 50, 157  
SRT, 126  
*stent*, x, 88, 90, 102, 103

## T

tabung Coolidge, ix, 37, 38  
tabung Crookes, 14, 17, 35  
tabung lucutan, 144  
TAN, 136

target, ix, 6, 16, 29, 30, 35, 36, 38, 39,  
40, 44, 46, 47, 55, 98, 124, 127,  
128, 129, 137  
teleterapi, 124  
terapi, 11, 41, 47, 52, 61, 75, 84, 88,  
90, 91, 115, 116, 117, 118, 119,  
121, 122, 123, 124, 127, 128, 129,  
156  
trombolisis, 89  
tungsten, 36

## **U**

U-Arm, 43, 85  
Universitas Wurzburg, 3, 13  
unsur kelumit, v, x, 11, 132, 133, 134,  
135, 136, 137, 138, 139  
USG, 51, 52, 67, 76, 78

## **V**

Van de Graaff, Robert J., 45  
VIR, 85

## **W**

Walton, Ernest T.S., 45  
WHO, 70, 83, 114, 153  
Wideroe, Rolf, 46  
wolfram, W, 36, 44

## **X**

XRF, x, 12, 136, 137, 138, 139

## BIODATA PENULIS



Mukhlis Akhadi lahir di Yogyakarta, 17 September 1961. Menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Indonesia (FMIPA-UI) di Jakarta pada 1980 dan memperoleh gelar sarjana fisika pada 1985. Sejak awal 1986 sampai sekarang, penulis bekerja sebagai peneliti pada Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN) di Jakarta. Meraih jabatan fungsional tertinggi sebagai Ahli Peneliti Utama bidang fisika nuklir sejak Desember 2002.

Beberapa pendidikan tambahan/spesialisasi yang pernah diperolehnya adalah: *Radiation Protection Course* di ANSTO (Australia, 1989), *Personal Dosimetry* di JAERI (Jepang 1991), *Working Area Monitoring* di JAERI (Jepang, 1992), *Workshop on the Application of the ICRP's 1990 Recommendations* di Kuala Lumpur (Malaysia, 1993), *Regional School of Radiation Emergency Management* di Fukushima (Jepang, 2017).

Mewakili BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standards* (BSS) di Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Vienna (Austria 1994). Ditunjuk BATAN menjadi anggota *Radiation Safety Standards Committee* (RASSC) di bawah koordinasi IAEA periode 2005-2007. Mengikuti kegiatan *Forum for Nuclear Cooperation in Asia* (FNCA) on *QA/QC radiation dosimetry for radiotherapeutic of cancer* di Cina tahun 2006. Sebagai partisipan dalam *Technical Meeting to Develop a Draft Text for the Revision of the BSS* di IAEA (Austria 2007).

Selain sebagai peneliti, penulis juga sering diminta sebagai pengajar pada berbagai jenis diklat yang diselenggarakan oleh BATAN. Pernah menjadi dosen tidak tetap pada jurusan teknik mesin, teknik elektro dan teknik sipil Sekolah Tinggi Teknik (STT)-PLN di Jakarta. Menulis delapan buku masing-masing dengan judul: (1) “Pengantar Teknologi Nuklir” (1997), (2) “Dasar-dasar Proteksi Radiasi” (2000), (3) “Ekologi Energi:

Mengenal Dampak Lingkungan dari Penggunaan Sumber-Sumber Energi” (2009), (4) “Isu Lingkungan Hidup: Mewaspada Dampak Kemajuan Teknologi dan Polusi Lingkungan Global yang Mengancam Kehidupan” (2014), (5) “Penanggalan Radioaktif: Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi dengan Teknik Nuklir” (2017), (6) “Jejak Perjalanan Teknologi Nuklir : dari Konsep Atomos hingga Traktat non-Proliferasi” (2018), (7) “Sentuhan Teknik Nuklir dalam Aktivitas Industri” (2018), dan (8) “Membaca Peta Nuklida” (2019).

**B**erbagai kalangan seperti akademis dan profesional sangat memerlukan informasi yang komprehensif tentang sinar-X. Pengetahuan di bidang ini merupakan salah satu bahasan penting dalam kuliah di Fakultas Kedokteran, Kedokteran Gigi, Penata *Roetgen*, Kesehatan Masyarakat, serta Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, terutama jurusan Fisika. Pada kehidupan modern, pemahaman yang baik tentang karakteristik sinar-X sangat diperlukan untuk penelitian dan pengembangan yang lebih luas mengenai aplikasi sinar-X di berbagai bidang, salah satunya adalah dalam rangka menjawab berbagai permasalahan di bidang kesehatan.

Pada praktiknya, pemanfaatan sinar-X untuk tujuan kesehatan harus melibatkan berbagai disiplin ilmu pengetahuan dan kerjasama antar para pakar. Alangkah baiknya jika pengetahuan tentang sinar-X yang dimiliki oleh para akademis dan profesional itu tidak parsial, misal mereka yang berkecimpung di bidang kesehatan hanya mengetahui tentang pemanfaatannya saja tanpa dibekali pengetahuan dasar tentang karakteristik fisika sinar-X, sementara mahasiswa akademisi di bidang MIPA hanya tahu tentang pesawat dan karakteristik fisika sinar-X tetapi tidak mengetahui aplikasinya yang begitu luas di bidang kesehatan.

# Sinar-X

## MENJAWAB MASALAH KESEHATAN



**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**  
Jl. Rajawali, Gang Elang 6 No.3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
cs@deepublish.co.id @penerbitbuku\_deepublish  
Penerbit Deepublish www.penerbitbukudeepublish.com

Kategori : Fisika Kesehatan

ISBN 978-623-02-0666-5



9 786230 206665