

ANALISIS UNSUR KELUMIT MELALUI PANCARAN SINAR-X KARAKTERISTIK

Mukhlis Akhadi

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Penemuan sinar-X oleh fisikawan Jerman Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895 ternyata mampu mengantarkan ke arah terjadinya perubahan mendasar dalam bidang kedokteran. Manusia mendapatkan jalan dalam memanfaatkan sinar-X penemuan W.C. Roentgen terutama untuk radiodiagnosa dalam bidang medis. Sinar-X mampu membedakan kerapatan dari berbagai jaringan dalam tubuh manusia yang dilewatinya. Dengan penemuan sinar-X ini, informasi mengenai tubuh manusia menjadi mudah diperoleh tanpa perlu melakukan operasi bedah. Proses pembuatan gambar anatomi tubuh manusia dengan sinar-X dapat dilakukan pada permukaan film fotografi. Gambar terbentuk karena adanya perbedaan intensitas sinar-X yang mengenai permukaan film setelah terjadinya penyerapan sebagian sinar-X oleh 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 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-paru, atau air seperti jaringan lunak pada umumnya. Jadi pada prinsipnya, bayangan gambar anatomi terbentuk karena adanya perbedaan kemampuan dalam menyerap maupun

meneruskan sinar-X yang melalui organ-organ tertentu di dalam tubuh.

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. Pada CT-scan misalnya, mampu membedakan antara dua jaringan yang sangat mirip dalam otak manusia, yaitu antara *grey matter* dengan *white matter*.

Radiasi pengion untuk keperluan diagnosa dalam medis terutama dipakai untuk mengetahui ada tidaknya kelainan dalam tubuh dengan menggunakan sinar-X. Termasuk dalam radiodiagnosa ini adalah pemeriksaan dengan *computed tomography scanner* (CT-scan), fluoroskopi, foto torax sinar-X konvensional dan radiografi anak. Prinsip kerja semua metode tersebut menggunakan pesawat sinar-X sebagai komponen utamanya. Dalam perjalanan pemanfaatan sinar-X yang sudah cukup panjang, manusia telah begitu banyak mempelajari karakteristik sinar-X. Namun teknologi yang berkaitan dengan sinar-X masih terus mengalami peningkatan dan penyempurnaan. Kini banyak kasus yang memerlukan penanganan secara

medis baru bisa ditangani setelah didiagnosa dengan Sinar-X.

Pemanfaatan sinar-X dalam bidang kedokteran untuk keperluan diagnosa sudah dikenal secara luas baik oleh para praktisi kesehatan maupun masyarakat umum. Radiasi pengion jenis foton (sinar gamma dan sinar-X) dalam perkembangan berikutnya juga dimanfaatkan untuk radioterapi. Kedua jenis radiasi tersebut mempunyai daya tembus yang tinggi terhadap organ tubuh dengan kemampuan tembusnya ditentukan oleh besar energi yang dimilikinya. Perkembangan dalam teknologi akselerator telah memberikan jalan diaplikasikannya sinar-X untuk radioterapi kanker. Dalam bidang terapi, banyak kasus kanker berhasil disembuhkan melalui radioterapi dengan sinar-X yang dibangkitkan dengan akselerator. Hadirnya alat pemercepat partikel semacam akselerator linier (LINAC) memungkinkan dilakukannya radioterapi kanker jenis tertentu dengan sinar-X berenergi tinggi.

Dalam usianya yang telah mencapai lebih dari 100 tahun, Sinar-X masih tetap mempunyai peran besar dalam dunia kesehatan, dan perannyapun masih akan terus meningkat dimasa mendatang seiring dengan meningkatnya pengetahuan dan penguasaan teknologi oleh umat manusia. Peran sinar-X dalam dunia kesehatan ternyata tidak berhenti hanya pada kegiatan radiodiagnosa dan radioterapi saja. 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, terutama mengenai fisika radiasi dan standarisasi radiasi, didukung pula oleh peningkatan kemampuan teknik dalam pemantauan radiasi, telah mengantarkan para ilmuwan ke arah pemanfaatan sinar-X karakteristik untuk penelitian medis. Dalam kegiatan ini, sinar-X dimanfaatkan untuk mendeteksi dan menganalisis unsur-unsur kelumit penyusun tubuh manusia. Dalam tulisan ini akan

dibahas lebih lanjut mengenai peran baru pemanfaatan sinar-X karakteristik untuk menganalisis unsur-unsur kelumit dalam bahan biologik untuk penelitian medis.

SPEKTRUM SINAR-X

a. Struktur Atom

Proses terbentuknya sinar-X dapat diterangkan dengan baik menggunakan teori atom menurut mekanika kuantum. Oleh sebab itu, sebelum membahas lebih lanjut mengenai sinar-X karakteristik, terlebih dahulu pada bagian ini akan dibahas struktur atom suatu materi yang peranannya sangat besar terhadap proses terbentuknya sinar-X karakteristik.

Teori atom yang dikemukakan oleh Bohr menyatakan bahwa sebuah elektron menempati orbit yang jelas dan pasti dalam gerakannya mengelilingi inti, seperti orbit planet mengelilingi matahari. Sedang pada tahun 1927 ahli fisika Jerman Werner Heisenberg membuktikan bahwa tidak mungkin menentukan dengan pasti posisi elektron dan momentumnya. Mekanika kuantum mengajarkan bahwa hal terbaik yang dapat dilakukan adalah menghitung kemungkinan matematis tentang letak elektron dalam daerah tertentu suatu ruangan.

Berdasarkan data-data yang terkumpul dari penemuan sebelumnya, ahli fisika Jerman Edwin Schrodinger mengemukakan model atom yang berbeda dari model-model sebelumnya. Model atom yang dikemukakannya memperhitungkan sifat gelombang dari elektron. Menurut teori atom ini, sebuah atom mempunyai muatan positif yang terletak di bagian tengah, tetapi elektron-elektronnya tidak berada pada orbit yang tetap. Hanya saja kebolehjadian untuk mendapatkan suatu elektron pada jarak tertentu dari inti dapat ditentukan, namun bukan merupakan jarak yang pasti dari inti ke sembarang elektron tertentu.

Setiap elektron dalam sebuah atom terikat oleh empat bilangan kuantum. Dua bilangan pertama ditemukan oleh Bohr, akan tetapi dia

tidak dapat menerangkan mengapa kedua bilangan itu ada. Schrodinger menunjukkan bahwa bilangan itu muncul sebagai tetapan dalam pemecahan persamaan gelombangnya. Kemudian dua bilangan kuantum lainnya ditemukan dan keduanya juga merupakan tetapan yang sama dengan tetapan sebelumnya. Bilangan kuantum menunjukkan keadaan energi sebuah elektron. Bilangan ini juga dapat digunakan untuk menunjukkan daerah ruang atau orbital tempat elektron itu kemungkinan dapat ditemukan. Keempat bilangan kuantum untuk menentukan kedudukan elektron dalam kulit atom tersebut adalah :

- *Bilangan kuantum utama* (n) yang menyatakan tingkat energi kulit atom dan mempunyai harga $n = 1, 2, 3$ dan seterusnya. Tingkat energi utama dari kulit atom dengan energi paling rendah adalah kulit yang letaknya paling dekat dengan inti dan mempunyai nilai $n = 1$. Kulit ini dinamai kulit K. Untuk kulit dengan tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu $n = 2, 3, 4$ dan sebagainya dinamai kulit L, M, N dan seterusnya.
- *Bilangan kuantum azimutal* (l) yang menyatakan banyaknya sub kulit atau sub tingkat energi pada masing-masing kulit atom. Harga l mulai dari 0 sampai dengan $(n-1)$. Sampai saat ini baru dikenal 4 sub kulit, yaitu : sub kulit *sharp* (s) dengan $l = 0$, sub kulit *principle* (p) dengan $l = 1$, sub kulit *diffuse* (d) dengan $l = 2$ dan sub kulit *fundamental* (f) dengan $l = 3$. Dengan demikian, pada kulit K dengan $n = 1$ hanya ada satu sub kulit dengan $l = 0$, pada kulit L ($n = 2$) terdapat 2 sub kulit dengan $l = 0$ dan $l = 1$, pada kulit M ($n = 3$) terdapat 3 sub kulit dengan $l = 0, l = 1$ dan $l = 2$ dan sebagainya.
- *Bilangan kuantum magnetik* (m) yang menyatakan banyaknya orbit elektron pada tiap-tiap sub kulit. Harga m mulai dari $-l$ sampai $+l$. Sub kulit s dengan $l = 0$ hanya mempunyai satu orbit elektron dengan $m = 0$. Sub kulit p dengan $l = 1$ mempunyai 3 orbit elektron dengan $m = -1, m = 0$ dan $m = +1$.

Dengan cara yang sama sub kulit d mempunyai 5 orbit elektron dan sub kulit f mempunyai 7 orbit elektron.

- *Bilangan kuantum spin* (s) yang menyatakan perputaran elektron pada porosnya. Harga s adalah $+1/2$ dan $-1/2$. Selain bergerak mengelilingi inti, elektron juga berputar pada porosnya sendiri seperti halnya bumi yang bergerak mengelilingi matahari sambil berputar pada porosnya sendiri. Dari bilangan kuantum spin didapatkan bahwa tiap orbit hanya bisa ditempati 2 buah elektron masing-masing dengan spin $+1/2$ dan $-1/2$. Dengan ketentuan ini, maka sub kulit s dengan 1 orbit maksimum berisi 2 elektron, sub kulit p dengan 3 orbit maksimum berisi 6 elektron, sub kulit d dengan 5 orbit maksimum berisi 10 elektron dan sub kulit f dengan 7 orbit maksimum berisi 14 elektron.

Dengan menggunakan keempat bilangan kuantum di atas maka jumlah maksimum elektron pada masing-masing kulit dapat ditentukan, yaitu $2n^2$ dengan n adalah bilangan kuantum utama. Namun ketentuan ini harus didasari oleh asas yang dikemukakan pada tahun 1925 oleh ahli fisika Austria Wolfgang Pauli yang mengatakan bahwa tidak mungkin ada dua elektron dalam satu atom yang memiliki lintasan dengan keempat bilangan kuantum (n, l, m dan s) tepat sama. Dengan aturan Pauli ini ternyata kulit dengan $n = 1$ sampai dengan $n = 4$ (kulit K, L, M dan N) masih dapat mengikuti aturan maksimum elektron yang diperkenankan, masing berisi 2, 8, 18 dan 32 buah elektron. Sedang kulit dengan $n = 5$ sampai dengan $n = 7$ (kulit O, P dan Q) tidak lagi memenuhi aturan $2n^2$, karena masing-masing kulit berturut-turut hanya berisi 32, 18 dan 2 buah elektron.

b. Sinar-X Bremsstrahlung

Pada pesawat sinar-X, metode terpenting dalam proses produksi sinar-X adalah proses yang dikenal dengan *bremsstrahlung*, yaitu istilah

dalam bahasa Jerman yang berarti radiasi pengereman (*braking radiation*). Elektron sebagai partikel bermuatan listrik yang bergerak dengan kecepatan tinggi, apabila melintas mendekati inti suatu atom, maka gaya tarik elektrostatik inti atom yang kuat dapat menyebabkan arah gerak elektron membelok dengan tajam. Peristiwa itu menyebabkan elektron kehilangan energinya dengan memancarkan radiasi elektromagnetik yang dikenal sebagai *sinar-X bremsstrahlung*.

Total bremsstrahlung per 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 yang sangat rendah sehingga nilai $(1/m)^2$ sangat tinggi. Efisiensi produksi sinar-X dengan cara ini juga sangat bergantung pada nomor atom (Z) bahan target. Bahan dengan Z tinggi menghasilkan lebih banyak sinar-X 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 :

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

dengan : Z adalah nomor atom bahan penyerap dan E_k adalah energi berkas dalam MeV.

Meskipun efisiensi diusahakan setinggi mungkin, namun untuk pesawat sinar-X pada umumnya, kurang dari 1 % energi elektron dapat diubah menjadi sinar-X, sedang sisanya muncul sebagai panas. Oleh karena itu, target harus dibuat dari bahan dengan titik lelehnya yang sangat tinggi dan harus mampu mengalirkan panas yang timbul. Berdasarkan perhitungan, 1 MeV berkas elektron akan kehilangan sekitar 6 % energinya menjadi sinar-X jika berkas tersebut diserap oleh timbal ($Z = 82$). Namun titik leleh timbal ternyata sangat rendah sehingga tidak dapat dipakai sebagai target dalam tabung

sinar-X. Fraksi bremsstrahlung yang terbentuk menjadi kecil apabila berkas elektron diserap oleh bahan bernomor atom rendah. Fraksi energi elektron yang berubah menjadi bremsstrahlung hanya 0,4 % jika diserap oleh aluminium ($Z = 13$).

Mengingat sebagian besar energi elektron berubah menjadi panas, maka pada bagian anoda pesawat sinar-X biasanya memiliki radiator bersip di bagian luar tabung untuk membantu proses pendinginan target. Pesawat sinar-X yang dioperasikan pada tegangan sangat tinggi, anodanya memiliki lubang pendinginan untuk mengalirkan minyak atau air ke dalamnya.

c. Sinar-X Karakteristik

Teori atom Bohr memudahkan perhitungan tentang adanya garis dalam spektrum suatu unsur. Apabila suatu unsur dipanasi, elektron bagian dalam orbit atom akan menyerap energi dari luar. Apabila suatu unsur didinginkan, elektron akan kehilangan energi dan kembali lagi ke orbit semula. Jika peristiwa ini terjadi, satu atau lebih kuantum energi akan dilepaskan dalam bentuk cahaya. Panjang gelombang maupun frekwensi cahaya yang dilepaskan bergantung pada kandungan energi dari kuantum yang dilepaskan.

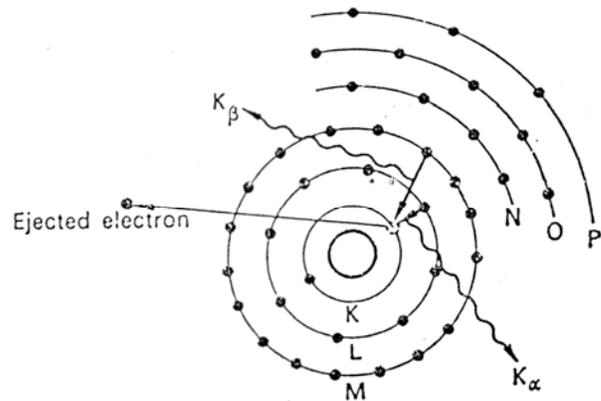
Sebuah elektron di dalam atom dapat berpindah dari lintasan tertentu ke lintasan lainnya. Lintasan-lintasan yang dilalui elektron akan menentukan tingkat energi elektron dalam lintasan itu. Lintasan yang paling stabil adalah yang paling dekat dengan inti, yaitu lintasan dengan $n = 1$. Dalam lintasan ini elektron mempunyai energi potensial yang paling rendah. Apabila elektron menyerap sejumlah energi tertentu dari luar, maka elektron itu dapat meloncat ke lintasan dengan energi potensial yang lebih tinggi, yaitu lintasan dengan $n = 2, 3, 4$ dan seterusnya. Dalam kondisi ini dikatakan bahwa elektron berada dalam keadaan tereksitasi sehingga tidak stabil. Pada saat elektron kembali ke keadaan dasarnya (kembali ke lintasan semula), elektron tersebut akan memancarkan

kelebihannya dalam bentuk radiasi elektromagnetik.

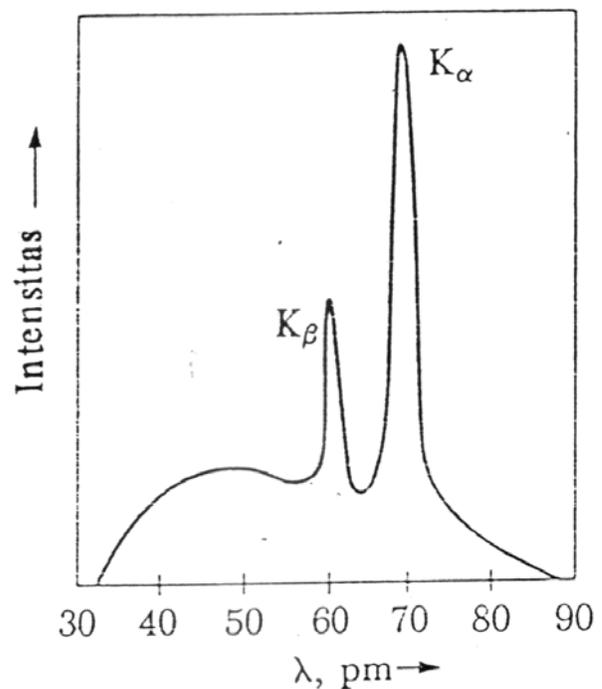
Sinar-X dapat pula terbentuk melalui proses perpindahan elektron atom dari tingkat energi yang lebih tinggi menuju ke tingkat energi yang lebih rendah. Adanya tingkat-tingkat energi dalam atom dapat digunakan untuk menerangkan terjadinya spektrum sinar-X dari suatu atom. Sinar-X yang terbentuk melalui proses ini mempunyai energi sama dengan selisih energi antara kedua tingkat energi elektron tersebut. Karena setiap jenis atom memiliki tingkat-tingkat energi elektron yang berbeda-beda, maka sinar-X yang terbentuk dari proses ini disebut sinar-X karakteristik. Sinar-X bremsstrahlung mempunyai spektrum energi kontinyu yang lebar, sementara spektrum energi dari sinar-X karakteristik adalah diskrit. Sinar-X karakteristik terbentuk melalui proses perpindahan elektron atom dari tingkat energi yang lebih tinggi menuju ke tingkat energi yang lebih rendah. Beda energi antara tingkat-tingkat orbit dalam atom target cukup besar, sehingga radiasi yang dipancarkannya memiliki frekwensi yang cukup besar dan berada pada daerah Sinar-X.

Sinar-X karakteristik terjadi karena elektron atom yang berada pada kulit K terionisasi sehingga terpental keluar. Kekosongan kulit K ini segera diisi oleh elektron dari kulit di luarnya. Jika kekosongan pada kulit K diisi oleh elektron dari kulit L, maka akan dipancarkan sinar-X karakteristik K_{α} . Jika kekosongan itu diisi oleh elektron dari kulit M, maka akan dipancarkan sinar-X karakteristik K_{β} . Oleh sebab itu, apabila spektrum sinar-X dari suatu atom berelektron banyak diamati, maka di samping spektrum sinar-X bremsstrahlung dengan energi kontinyu, juga akan terlihat pula garis-garis tajam berintensitas tinggi yang dihasilkan oleh transisi K_{α} , K_{β} dan seterusnya. Jadi sinar-X karakteristik timbul karena adanya transisi elektron dari tingkat energi lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Adanya dua jenis sinar-X menyebabkan munculnya dua macam spektrum sinar-X, yaitu spektrum

kontinyu yang lebar untuk spektrum bremsstrahlung dan dua buah atau lebih garis tajam untuk sinar-X karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



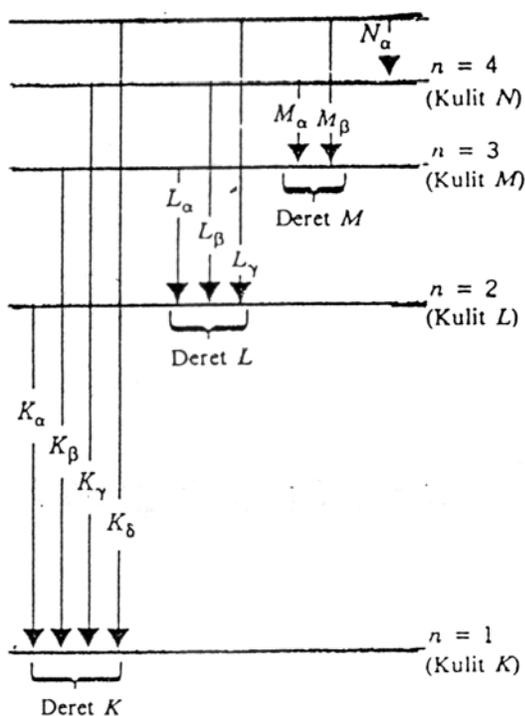
Gambar 1 : Proses terbentuknya sinar-X karakteristik



Gambar 2 : Spektrum energi Sinar-X

Setiap atom memiliki sinar-X karakteristik dengan energi yang berbeda-beda, sehingga pancaran sinar-X karakteristik itu dapat dipakai untuk mengidentifikasi atom. Spektrum energi

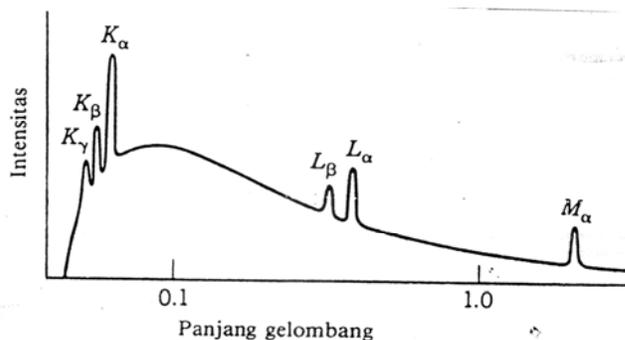
yang lebih kompleks juga dapat terjadi pada target dari atom-atom tertentu. Jika elektron pada kulit K ($n=1$) yang terpental keluar, maka elektron dari orbit yang lebih tinggi akan mengisi kekosongan orbit K disertai dengan pancaran sederetan garis spektrum yang dinyatakan dalam notasi sinar-X sebagai garis K_α , K_β , K_γ 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 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



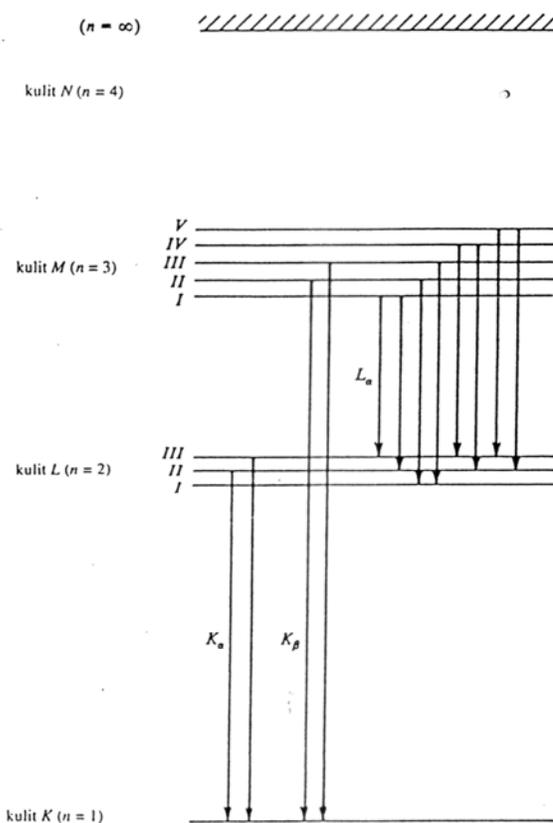
Gambar 3 : Transisi elektron pada atom berelektron banyak

Apabila spektrum sinar-X dari suatu atom berelektron banyak diamati, maka di samping spektrum sinar-X bremsstrahlung dengan energi kontinyu, juga akan terlihat pula garis-garis tajam berintensitas tinggi yang dihasilkan oleh transisi K_α , K_β , K_γ , L_α , L_β , M_α dan seterusnya seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pengamatan yang lebih teliti mengungkapkan bahwa tiap-tiap spektrum garis sinar-X karakteristik ini ternyata

tersusun atas sejumlah garis rapat seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pemisahan garis-garis spektrum ini berasal dari pemisahan struktur halus tingkat-tingkat energi atom, mengingat setiap kulit atom terdiri atas beberapa sub kulit sesuai dengan bilangan kuantum azimutalnya.



Gambar 4 : Spektrum energi sinar-X dari atom target perak (Ag)



Gambar 5 : Transisi halus tingkat-tingkat energi atom

FLUORESENSI SINAR-X

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/kelumit (*trace element*) 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.

Keberadaan unsur-unsur kelumit penyusun tubuh tadi 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. Keberadaan unsur-unsur kelumit tidak memenuhi jumlah minimal yang dikehendaki oleh metode konvensional. Karena kendala jumlah ini, maka metode analisis kimia biasa kurang bisa memainkan peranannya. 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 Analisis Pengaktifan Neutron (APN) maupun dengan mengamati pancaran sinar-X karakteristik dari unsur tersebut. Tulisan ini akan membahas lebih lanjut mengenai teknik analisis unsur kelumit dengan menganalisis pancaran sinar-X karakteristik unsur.

Teknik fluoresensi sinar-X dapat dipakai untuk menentukan kandungan mineral kelumit dalam bahan biologik maupun dalam tubuh secara langsung. Di beberapa negara maju, teknik ini banyak digunakan untuk memeriksa kandungan unsur kelumit yodium (I) stabil baik

yang terdapat dalam kelenjar gondok, darah maupun urine. Yodium 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*).

Teknik pemeriksaan kandungan I di dalam tubuh dapat dilakukan dengan cara menembakkan radiasi foton elektromagnetik ke sasaran yang diteliti. Sumber radiasi yang sering digunakan adalah radioisotop amerisium-241 (^{241}Am) dengan radiasi elektromagnetik yang dipancarkannya berenergi 60 keV. Radiasi elektromagnetik yang dipancarkan dari ^{241}Am akan berinteraksi dengan sebuah elektron yang berada di kulit K unsur I di dalam tubuh atau bahan biologik 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. Disinilah teknik fluoresensi sinar-X memiliki kelebihan dalam menganalisis unsur kelumit dalam tubuh dibandingkan dengan teknik analisis lainnya. 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.

ANALISIS KUANTITATIF

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 lithium (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 moderen 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 penganalisis 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 biologik lainnya yang diperiksa.

PENUTUP

Peran sinar-X dalam dunia kesehatan ternyata tidak berhenti hanya pada kegiatan radiodiagnosa dan radioterapi saja. Studi secara intensif oleh para pakar pada giliran berikutnya telah mengantarkan ke arah penemuan pemanfaatan yang lain dari sinar-X. Pengamatan pancaran sinar-X karakteristik dari suatu bahan ternyata mampu mengenali atom-atom penyusun bahan itu. Bahan biologis yang mengandung unsur-unsur kelumit ternyata dapat diidentifikasi lebih lanjut dengan teknik ini.

Pemanfaatan teknik analisis unsur kelumit melalui pancaran sinar-X karakteristik dalam bidang kedokteran memberikan keuntungan tersendiri, mengingat unsur-unsur kelumit dalam tubuh manusia seringkali sulit dianalisis dengan metode konvensional. Perkembangan baru dalam pemanfaatan sinar-X ini tentu memiliki arti yang sangat besar dalam upaya meningkatkan kualitas pelayanan medis untuk meningkatkan taraf kesehatan publik pada umumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- CHEMBER, H., Introduction to Health Physics, Pergamon Press, New York (1987).
- GAUTREAU, R. and SAVIN, W., Fisika Modern (terjemahan oleh Hans J. Wopspakirk), Penerbit Erlangga, Jakarta 10430 (1995).
- GROTH, S., Lasting Benefits, Nuclear Application in Health Care, *IAEA Bulletin*, Vol. 42 (1), Vienna, Austria (March 2000), pp. 33-40.
- HODDESON, L., Teori Kuantum, *Ilmu Pengetahuan Populer*, Vol. 5, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997) hal. 137-148.
- KAPLAN, I., Nuclear Physics (2nd edition), Addison-Wesley Publishing Company, London (1979).
- MARTIN, A. and HARBINSON, A.S., An Introduction to Radiation Protection, Chapman and Hall, London (1986).
- MERRICK, H., Sinar-X, *Ilmu Pengetahuan Populer*, Vol. 10, Grolier International Inc./P.T. Widyadara (1997) hal. 144-151.
- WIHARTO, K., Penerapan Teknik Nuklir Dalam Kedokteran, *Buletin BATAN*, Th. XII (2), Badan Tenaga Atom Nasional, Jakarta (1991) Hal. 1-9.
- WIHARTO, K., Kedokteran Nuklir dan Aplikasi Teknik Nuklir dalam Kedokteran, *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan PSPKR-BATAN*, Jakarta (1996), hal. 8-15.
- YOUNG, H.D. and FREEDMAN, R.A., University Physics (9th edition), Addison-Wesley Publishing Company, New York (1998).