

2. Radioaktivitas

Atom terdiri atas inti atom dan elektron-elektron yang beredar mengitarinya. Reaksi kimia biasa (seperti reaksi pembakaran dan penggaraman), hanya menyangkut perubahan pada kulit atom, terutama elektron pada kulit terluar, sedangkan inti atom tidak berubah. Reaksi yang menyangkut perubahan pada inti disebut reaksi inti atau reaksi nuklir (nukleus=inti).

Reaksi nuklir ada yang terjadi secara spontan ataupun buatan. Reaksi nuklir spontan terjadi pada inti-inti atom yang tidak stabil. Zat yang mengandung inti tidak stabil ini disebut zat radioaktif. Adapun reaksi nuklir tidak spontan dapat terjadi pada inti yang stabil maupun, inti yang tidak stabil. Reaksi nuklir disertai perubahan energi berupa radiasi dan kalor. Berbagai jenis reaksi nuklir disertai pembebasan kalor yang sangat dasyat, lebih besar dan reaksi kimia biasa.

Pada tahun 1895, W.C. Rontgen menemukan bahwa tabung sinar katode menghasilkan suatu radiasi berdaya tembus tinggi yang dapat menghitamkan film potret, walupun film tersebut terbungkus kertas hitam. Karena belum mengenal hakekatnya, sinar ini dinamai sinar X. Ternyata sinar X adalah suatu radiasi elektromagnetik yang timbul karena benturan berkecepatan tinggi (yaitu sinar katode dengan suatu materi (anode). Sekarang sinar X disebut juga sinar rontgen dan digunakan untuk rongent yaitu untuk mengetahui keadaan organ tubuh bagian dalam.

Penemuan sinar X membuat *Henry Becquerel* tertarik untuk meneliti zat yang bersifat fluorensensi, yaitu zat yang dapat bercahaya setelah terlebih dahulu mendapat radiasi (disinari), Becquerel menduga bahwa sinar yang dipancarkan oleh zat seperti itu seperti sinar X. Secara kebetulan, Becquerel meneliti batuan uranium. Ternyata dugaan itu benar bahwa sinar yang dipancarkan uranium dapat menghitamkan film potret yang masih terbungkus kertas hitam. Akan tetapi, Becqueret menemukan bahwa batuan uranium memancarkan sinar berdaya tembus tinggi dengan sendirinya tanpa harus disinari terlebih dahulu. Penemuan ini terjadi pada awal bulan Maret 1896. Gejala semacam itu, yaitu pemancaran radiasi secara spontan, disebut keradioaktifan, dan zat yang bersifat radioaktif disebut zat radioaktif.

Zat radioaktif yang pertama ditemukan adalah uranium. Pada tahun 1898, Marie Curie bersama-sama dengan suaminya Pierre Curie menemukan dua unsur lain dari

batuan uranium yang jauh lebih aktif dari uranium. Kedua unsur itu mereka namakan masing-masing polonium (berdasarkan nama Polonia, negara asal dari Marie Curie), dan radium (berasal dari kata Latin radiare yang berarti bersinar).

Ternyata, banyak unsur yang secara alami bersifat radioaktif. Semua isotop yang bernomor atom di atas 83 bersifat radioaktif. Unsur yang bernomor atom 83 atau kurang mempunyai isotop yang stabil kecuali teknesium dan promesium. Isotop yang bersifat radioaktif disebut isotop radioaktif atau radioisotop, sedangkan isotop yang tidak radioaktif disebut isotop stabil. Dewasa ini, radioisotop dapat juga dibuat dari isotop stabil. Jadi disamping radioisotop alami juga ada radioisotop buatan.

Pada tahun 1903, Ernest Rutherford mengemukakan bahwa radiasi yang dipancarkan zat radioaktif dapat dibedakan atas dua jenis berdasarkan muatannya. Radiasi yang bermuatan positif dinamai sinar alfa, dan yang bermuatan negatif diberi nama sinar beta. Selanjutnya Paul U. Viillard menemukan jenis sinar yang ketiga yang tidak bermuatan dan diberi nama sinar gamma.

a. Sinar alfa (α)

Sinar alfa merupakan radiasi partikel yang bermuatan positif. Partikel sinar alfa sama dengan inti helium ^4_2He , bermuatan $+2e$ dan bermassa 4 sma. Partikel alfa adalah partikel terberat yang dihasilkan oleh zat radioaktif. Sinar alfa dipancarkan dari inti dengan kecepatan sekitar $1/10$ kecepatan cahaya. Karena memiliki massa yang besar, daya tembus sinar alfa paling lemah diantara diantara sinar-sinar radioaktif. Diudara hanya dapat menembus beberapa cm saja dan tidak dapat menembus kulit. Sinar alfa dapat dihentikan oleh selembar kertas biasa. Sinar alfa segera kehilangan energinya ketika bertabrakan dengan molekul media yang dilaluinya. Tabrakan itu mengakibatkan media yang dilaluinya mengalami ionisasi. Akhirnya partikel alfa akan menangkap 2 elektron dan berubah menjadi atom helium

b. Sinar beta (β)

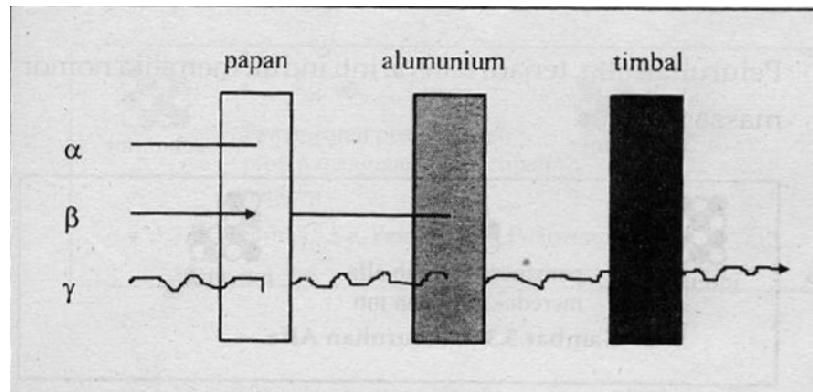
Sinar beta merupakan radiasi partikel bermuatan negatif. Sinar beta merupakan berkas elektron yang berasal dari inti atom. Partikel beta yang bermuatan $-1e$ dan bermassa $1/1836$ sma. Karena sangat kecil, partikel beta dianggap tidak bermassa sehingga dinyatakan dengan notasi $^0_{-1}\text{e}$. Energi sinar beta sangat bervariasi, mempunyai daya tembus lebih besar dari sinar alfa tetapi daya pengionnya lebih lemah. Sinar beta paling

energetik dapat menempuh sampai 300 cm dalam uadara kering dan dapat menembus kulit.

c. Sinar gamma (γ)

Sinar gamma adalah radiasi elektromagnetek berenergi tinggi, tidak bermuatan dan tidak bermassa. Sinar gamma dinyatakan dengan notasi ${}^0_0\gamma$. Sinar gamma mempunyai daya tembus. Selain sinar alfa, beta, gamma, zat radioaktif buatan juga ada yang memancarkan sinar X dan sinar Positron. Sinar X adalah radiasi sinar elektromagnetik.

Radioaktivitas merupakan Salah satu gejala yang sangat penting dari inti atom. Meskipun nuklida-nuklida diikat oleh gaya inti yang cukup kuat, banyak nuklida yang tidak mantap secara spontan meluruh menjadi nuklida lain melalui pemancaran partikel alpha, beta dan gamma. Energi gamma lebih besar dibandingkan dengan energi beta dan alfa. Sedangkan radiasi yang energinya terkecil adalah partikel alfa.



Gambar 2.1. Ilustrasi daya tembus partikel alfa, beta, gamma.

2.1 Satuan Radiasi

Berbagai satuan digunakan untuk menyatakan intensitas atau jumlah radiasi bergantung pada jenis yang diukur.

a. Curie(Ci) dan Becquerrel (Bq)

Curie dan Bequerrel adalah satuan yang dinyatakan untuk menyatakan keaktifan yakni jumlah disintegrasi (peluruhan) dalam satuan waktu. Dalam sistem satuan SI, keaktifan dinyatakan dalam Bq. Satu Bq sama dengan satu disintegrasi per sekon.

$$1\text{Bq} = 1 \text{ dps}$$

dps = disintegrasi per sekon

Satuan lain yang juga biasa digunakan ialah Curie. Satu Ci ialah keaktifan yang setara dari 1 gram garam radium, yaitu $3,7 \cdot 10^{10}$ dps.

$$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ dps} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

b. Gray (gy) dan Rad (Rd)

Gray dan Rad adalah satuan yang digunakan untuk menyatakan keaktifan yakni jumlah (dosis) radiasi yang diserap oleh suatu materi. Rad adalah singkatan dari 11 radiation absorbed dose. Dalam sistem satuan SI, dosis dinyatakan dengan Gray (Gy). Satu Gray adalah absorpsi 1 joule per kilogram materi.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Satu rad adalah absorpsi 10^{-3} joule energi/gram jaringan.

$$1 \text{ Rd} = 10^{-3} \text{ J/g}$$

Hubungan grey dengan rad

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$$

3. Rem

Daya perusak dari sinar-sinar radioaktif tidak saja bergantung pada dosis tetapi juga pada jenis radiasi itu sendiri. Neutron, sebagai contoh, lebih berbahaya daripada sinar beta dengan dosis dan intensitas yang sama. Rem adalah satuan dosis setelah memperhitungkan pengaruh radiasi pada makhluk hidup (rem adalah singkatan dari radiation equivalent for man)

2.2 Pengaruh Radiasi

Radiasi menyebabkan penumpukan energi pada materi yang dilalui. Dampak yang ditimbulkan radiasi dapat berupa ionisasi, eksitasi, atau pemutusan ikatan kimia. Ionisasi: dalam hal ini partikel radiasi menabrak elektron orbital dari atom atau molekul zat yang dilalui sehingga terbentuk ion positif dan elektron terion.

Eksitasi: dalam hal ini radiasi tidak menyebabkan elektron terlepas dari atom atau molekul zat tetapi hanya berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Pemutusan Ikatan

Kimia: radiasi yang dihasilkan oleh zat radioaktif mempunyai energi yang dapat memutuskan ikatan-ikatan kimia.

2.3 Pengaruh Radiasi pada makhluk hidup

Walaupun energi yang ditumpuk sinar radioaktif pada makhluk hidup relatif kecil tetapi dapat menimbulkan pengaruh yang serius. Hal ini karena sinar radioaktif dapat mengakibatkan ionisasi, pemutusan ikatan kimia penting atau membentuk radikal bebas yang reaktif. Ikatan kimia penting misalnya ikatan pada struktur DNA dalam kromosom. Perubahan yang terjadi pada struktur DNA akan diteruskan pada sel berikutnya yang dapat mengakibatkan kelainan genetik, kanker dll.

Pengaruh radiasi pada manusia atau makhluk hidup juga bergantung pada waktu paparan. Suatu dosis yang diterima pada sekali paparan akan lebih berbahaya daripada bila dosis yang sama diterima pada waktu yang lebih lama.

Secara alami kita mendapat radiasi dari lingkungan, misalnya radiasi sinar kosmis atau radiasi dari radioaktif alam. Disamping itu, dari berbagai kegiatan seperti diagnosa atau terapi dengan sinar X atau radioisotop. Orang yang tinggal disekitar instalasi nuklir juga mendapat radiasi lebih banyak, tetapi masih dalam batas aman.

2.4 Efek Radiasi pada Tubuh Manusia

Radiasi dapat mengganggu fungsi normal tubuh manusia, dari taraf yang paling ringan hingga fatal. Derajat taraf ini tergantung pada beberapa faktor:

1. Jenis radiasi
 - Radiasi eksterna: merupakan radiasi yang berasal dari luar tubuh manusia yang dapat memberikan radiasi total pada tubuh atau partial/sebagian. Radiasi dari sumber alpha dan beta yang berkekuatan kurang dari 65 KeV, tidak cukup kuat untuk menembus kulit manusia, sehingga tidak berbahaya. Radiasi dari sumber sinar-X dan gamma serta neutron lain yang lebih besar dari 65 KeV, cukup kuat untuk menembus kulit manusia sehingga cukup berbahaya.
 - Radiasi interna, adalah masuknya radionuklida pada tubuh manusia melalui saluran pernapasan, saluran pencernaan, dan luka pada kulit.
2. Lamanya penyinaran.
3. Jarak sumber dengan tubuh.
4. Ada tidaknya penghalang antara sumber dengan tubuh.

Interaksi Radiasi dengan Tubuh Manusia

Apabila tubuh manusia terkena radiasi maka partikel-partikel radiasi akan secara langsung mengadakan interaksi dengan bagian yang terkecil dari sel, yakni atom-atom yang ada di sel. Adapun interaksi tersebut dapat berlangsung secara langsung maupun tidak langsung.

Interaksi langsung terjadi apabila penyerapan energi langsung pada molekul-molekul organik dalam sel yang mempunyai arti biologik penting, seperti DNA. Sedangkan interaksi radiasi tidak langsung terjadi bila interaksi radiasi dengan molekul-molekul air dalam sel berlangsung lebih dahulu, kemudian efeknya mengenai molekul-molekul organik yang penting. Hal ini terjadi karena 80% tubuh manusia terdiri dari air. Akibat interaksi ini, terjadi proses ionisasi atau eksitasi atom-atom dalam sel yang bisa menyebabkan terjadinya perubahan struktur kimiawi dari molekul DNA, atau terjadi mutasi titik (*point mutation*) dalam sel tersebut. Ini menyebabkan perubahan yang berat dari struktur kromosom (*chromosome aberration*).

Perubahan struktur kromosom kemungkinan menyebabkan kerusakan pada tingkatan tertentu dalam suatu organ. Hal ini akan terjadi pada sel yang peka terhadap radiasi (*sensitive organ*). Namun, bisa terjadi sebaliknya, yaitu akibat interaksi dengan radiasi bisa sembuh dengan sendirinya melalui proses biologis dalam sel, disebut dengan proses perbaikan sendiri (*cell repair*). Hal ini tergantung pada kemampuan dan macam sel yang bersangkutan. Jika perbaikannya tidak sempurna, akan menghasilkan sel yang tetap hidup, tetapi sudah berubah. Di lain, pihak partikel radiasi dapat pula mengadakan interaksi dengan molekul air dalam sebuah sel. Dimungkinkan juga terjadi perubahan-perubahan sehingga terbentuk molekul-molekul baru, yaitu H₂O₂ dan HO₂ yang amat beracun yang mengakibatkan kerusakan-kerusakan jaringan tubuh.

Selain melalui kedua proses tersebut, radiasi dapat pula menyebabkan terjadinya reaksi-reaksi kimiawi lain dalam organ atau jaringan tubuh, seperti reaksi protein denaturalisasi dan perubahan enzimatik. Juga reaksi hormonal dalam jaringan, yang pada akhirnya akan

lebih mempercepat proses kerusakan yang kronis dan tetap, terutama pada organ-organ yang tetap.

Efek Biologis Akibat Interaksi antara Radiasi dan Jaringan Tubuh Manusia

Kemungkinan terjadinya efek biologis akibat interaksi radiasi dan jaringan tubuh manusia (terlepas dari berat atau ringannya akibat biologis tersebut), berbanding selaras dengan besarnya dosis radiasi yang mengenai jaringan tersebut. Semua dosis radiasi, besar atau kecil, bisa mengakibatkan pengaruh terhadap jaringan tubuh atau sel. Pengaruh dosis hanya diasosiasikan dengan besarnya kemungkinan bahwa akan terjadi suatu perubahan dalam suatu sel atau jaringan yang terkena radiasi tersebut, yang biasa disebut dengan "efek stokastik". Efek stokastik ini biasanya mempunyai kelainan dari organ yang bersifat kronis yang biasanya dihubungkan dengan terjadinya perubahan-perubahan genetik dalam sel-sel tersebut.

Selain dikenal dengan efek stokastik, juga dikenal dengan efek deterministik atau non-stokastik, yaitu jika sel dalam organ atau jaringan banyak yang mati atau tidak dapat lagi bereproduksi dan berfungsi secara normal, fungsi organ akan hilang. Hilangnya fungsi itu akan semakin parah bila jumlah sel yang menderita akibat bertambah.

Beberapa efek biologi pada tubuh manusia :

1. Efek genetik.

Efek biologi dari radiasi ionisasi pada generasi yang belum lahir disebut efek genetik. Efek ini timbul karena kerusakan molekul DNA pada sperma atau ovarium akibat radiasi. Atau, bila radiasi berinteraksi dengan makro molekul DNA, dapat memodifikasi struktur molekul ini dengan cara memecah kromosom atau mengubah jumlah DNA yang terdapat dalam sel melalui perubahan informasi genetik sel. Tipe ini dapat menimbulkan penyakit genetik yang diteruskan ke generasi berikutnya.

2. Efek somatik

Bila organisme (seperti manusia) yang terkena radiasi mengalami kerusakan biologi sebagai akibat penyinaran, efek penyinaran tersebut diklasifikasikan sebagai efek somatik. Efek ini tergantung pada lamanya terkena radiasi sampai pertama timbulnya gejala kerusakan radiasi. Selanjutnya diklasifikasikan sebagai efek somatik jangka pendek atau jangka panjang.

Efek somatik jangka pendek

Efek ini timbul dalam waktu beberapa menit, jam, atau minggu sejak penyinaran radiasi. Efek dari dosis yang tinggi terlihat dengan gejala: mual, lemas, eritema (kemerahan abnormal di kulit), epilasi (rontoknya rambut), gangguan darah, gangguan entistimal, demam dan terkelupasnya lapisan luar kulit, berkurangnya jumlah sperma pada pria, kemandulan tetap atau sementara dari wanita dan pria, serta kerusakan sistem syaraf pusat (pada dosis radiasi yang sangat tinggi). Beberapa efek somatik jangka pendek:

a. Sindrom radiasi akut

Sindrom radiasi akut terjadi setelah seluruh tubuh manusia menerima dosis radiasi ionisasi yang besar dalam waktu singkat. Sindrom radiasi akut ini termanifestasi dalam 4 tahap:

- Tahap prodromal: terjadi beberapa jam setelah penyinaran, dengan ciri-ciri mual, muntah, diare, dan lemas.
- Tahap laten: gejala seperti tahap prodromal, sudah tidak terlihat dalam satu minggu.
- Tahap manifes: gejala ini terlihat pada akhir minggu pertama atau setelah tahap laten. Beberapa gejalanya antara lain bingung, epilasi, haus, diare yang parah, demam, infeksi, perdarahan, dan gangguan kardiovaskular.
- Tahap kesembuhan atau kematian: setelah mengalami ketiga tahap tersebut, kemungkinan yang akan terjadi adalah kesembuhan atau kematian. Kematian terjadi apabila seluruh tubuh menerima penyinaran

dosis subtotal sebesar 2-3 Gray (200-300 rad), sedang kesembuhan terjadi dalam waktu 3 bulan.

b. Sindrom hematopoetik (sindrom tulang)

Terjadi setelah tubuh manusia menerima dosis radiasi sebesar 1-10 Gray (100-1000 rad). Penyinaran ini menyebabkan jumlah sel darah putih, sel darah merah, dan platelet dalam aliran darah akan berkurang. Juga dapat menimbulkan kerusakan sel-sel lain dalam organ sehingga sistem organ gagal berfungsi atau tubuh kehilangan kemampuan melawan infeksi. Dengan demikian, tubuh akan makin mudah terserang infeksi yang akhirnya mengalami perdarahan.

c. Sindrom gastrointestinal

Pada manusia, sindrom gastrointestinal timbul pada dosis 1 Gray (100 rad), dengan gejala-gejala mual yang parah, muntah, diare, hilangnya nafsu makan, perdarahan pada saluran GI, infeksi, lemas, demam, anemia, ketidakseimbangan elektrolit, dan hilangnya cairan tubuh yang kemudian berakibat fatal, yaitu meninggal. Kejadian tersebut terjadi dalam waktu 3--5 hari setelah penyinaran.

d. Sindrom sistem saraf pusat

Merupakan radiasi akut karena dosis yang diterima sekitar 50 Gray(5000 rad). Orang yang terkena radiasi ini akan menunjukkan gejala dis-orientasi serta syok, diiringi mual yang parah, muntah, diare cair, terkaget-kaget disertai bingung dan kurang terkoordinasi, serta rasa terbakar pada kulit. Juga edema, hilangnya keseimbangan, lemas, kejang-kejang, ketidakseimbangan elektrolit, frustrasi, koma, dan kematian karena gangguan kardiovaskular. Hasil akhir dari kerusakan ini adalah kegagalan sistem saraf pusat yang menimbulkan kematian segera.

Efek somatik jangka panjang

Efek ini timbul beberapa bulan atau tahun setelah terkena radiasi. Efek ini timbul akibat dosis radiasi yang tinggi atau dosis rendah yang kronis selama bertahun-tahun terhadap seluruh atau sebagian tubuh. Ada 4 tipe efek somatik jangka panjang:

a. Karsinogenesis

Kanker pada manusia karena radiasi dapat timbul setelah 5 tahun atau lebih. Namun, sulit membedakan antara karena radiasi atau penyebab yang lain, karena keadaan fisiknya tidak berbeda. Contoh kanker karena radiasi antara lain: (a) Beberapa pekerja industri-industri pembuatan jarum radium di beberapa pabrik; (b) Pekerja tambang uranium; (c) Pekerja radiasi medis yang ceroboh dalam pekerjaannya.

b. Nodula dan karsinoma tiroid Terjadi setelah 20 tahun kemudian, akibat radiasi sinar-X yang harus diterima dengan dosis terapeutik (1,2-60 Gray).

c. Katarogenesis

Dosis radiasi ionisasi yang mengenai tubuh sebesar 1 Gray (100 rad) atau lebih dapat mendorong pembentukan katarak (opositas lensa mata). Hal ini berakibat kebutaan.

d. Embriologi

Semua makhluk hidup sangat sensitif terhadap radiasi selama tahap embrionik. Periode pembuahan, di mana embrio atau fetus terkena radiasi, dapat menimbulkan kematian atau gangguan kongenital tertentu. Perkembangan embrionik dalam kandungan dapat dibagi menjadi 3 tahap: *Pertama*, yaitu preimplantasi dan implantasi yang dimulai sejak proses pembuahan yang terjadi sampai umur 2 minggu. apabila terkena radiasi maka akan terjadi kematian pada embrionik tersebut. *Kedua*, yaitu organosis pada masa kehamilan 2-7 minggu. Efek yang mungkin timbul berupa malformasi tubuh dan kematian neonatal. *Ketiga*, yaitu tahap fetus pada usia kehamilan 8-40 minggu. Efek yang mungkin timbul berupa retardasi pertumbuhan dan retardasi mental. Risiko yang paling berat adalah terjadinya leukemia pada masa anak-anak.

Menurut *International Commission Radiation Protection (ICRP-60)* untuk orang dewasa sehat, dosis yang menyebabkan kematian pada 50% populasi yang terpajan radiasi

seluruh tubuh dalam waktu 60 hari (Lethal Dose 50/60) berkisar antara 2,5-5 Gray (2500-5000 rad), dengan dosis rerata sekitar 3,5 Gray (3500 rad). Dengan demikian, seseorang diharapkan tidak akan mengalami kematian setelah terpajan radiasi seluruh tubuh dengan dosis di bawah 1 Gray (1000 rad) selama individu tersebut tidak dalam kondisi sakit sebelum terkena pajanan radiasi.

Bila dosis yang diterima antara 6-10 Gray, kebanyakan individu akan mengalami kematian, kecuali bila segera mendapat penanganan medis yang tepat untuk mencegah terjadinya infeksi dan perdarahan. Di atas 10 Gray, kematian akan terjadi meskipun telah dilakukan usaha seperti transplantasi sumsum tulang dari donor yang sesuai.

Agar efek biologis akibat radiasi tidak terjadi, atau bila harus terjadi di bawah dosis ambang, dalam pelaksanaan diperlukan prosedur penggunaan untuk menjamin terhindarnya dari pajanan radiasi .