

buku **Pintar Nuklir**



Buku Pintar Nuklir

Penyusun

Dra. Zubaidah Alatas, M.Si
Dra. Sri Hidayati, M. Si
Drs. Mukhlis Akhadi, Apu
Dra. Maryati Purba, M.Si
Dr. Dhandang Purwadi
Dr. Sudi Ariyanto
Dr. Hendig Winarno
Ir. Rismiyanto
Dra. Etty Sofyatiningrum. M.Ed
Drs. Hendriyanto H., M.Sc
Dr. Herry Widystono, Apu
Ir. Eko Madi Parmanto
Dr. Syahril

Editor

Ir. Ruslan

Mitra Bestari

Dimas Irawan, M.Si
Theresia Erni, S.Si
Reni Andraeni, A.Md
Adipurwa Muslich, S.Si
Niki Fidiarini, A.Md
Wisono, S.Kom
Trisni Widiawati
Astu Normasari, S.Si

Kata Pengantar

Perkembangan suatu bangsa sangat ditentukan oleh penguasaan terhadap ilmu pengetahuan dan teknologi (Iptek). Beberapa Negara telah membuktikan bahwa dengan menguasai Iptek maka pembangunan di berbagai infrastrukturnya mengalami kemajuan yang sangat pesat. Amerika Serikat, Rusia, Inggris, Jerman dan Perancis adalah contoh Negara-negara yang lebih dahulu memimpin dalam menguasai Iptek dibandingkan dengan Negara-negara lainnya, sehingga dapat dilihat bahwa pembangunan Negara dan bangsanya maju pesat, bahkan produk teknologinya bisa mendominasi di tingkat internasional.

Iptek nuklir adalah bagian yang tidak terpisahkan dari ilmu pengetahuan dan teknologi secara umum. Seperti halnya bidang lainnya Iptek nuklir mengalami kemajuan yang sangat pesat. Iptek nuklir yang pada saat lahirnya hanya dikembangkan untuk persenjataan kini sudah mengalami perubahan dan lebih diarahkan untuk maksud-maksud damai. Dalam perkembangannya, Iptek nuklir sudah memiliki peran penting dalam memajukan ilmu-ilmu lainnya, seperti di bidang kesehatan, industry, pertanian dan energy.

Sebagaimana Negara-negara lainnya, Indonesia juga mengembangkan Iptek nuklir untuk maksud damai. Pengembangan Iptek nuklir di Indonesia sudah dimulai sejak tahun 1958 dengan didirikannya Lembaga Atom (LTA) yang saat ini menjadi Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Hasil pengembangan Iptek nuklir telah banyak memberikan kontribusi untuk kemajuan berbagai sector pembangunan, terutama di bidang kesehatan, industry dan pertanian.

Untuk memahami kemanfaatan Iptek nuklir kita perlu mempelajarinya, baik yang bersifat tingkat dasar maupun lanjut. Hal ini penting mengingat Iptek nuklir memiliki dua sisi yang sangat berlawanan, yaitu antara manfaat dan resiko. Selain segi manfaat, Iptek nuklir dapat bersifat berbahaya apabila penggunaannya dilakukan tidak berdasarkan filosofi keselamatan yang sudah ditetapkan.

Di dalam buku ini dapat dipelajari Iptek nuklir dari teori dasar hingga pemanfaatannya di berbagai bidang. Dengan mempelajari buku ini diharapkan para siswa, terutama di tingkat Sekolah Menengah Atas (SMA) dapat memahami tentang arti pentingnya Iptek nuklir bagi kehidupan manusia. Selain dari sisi kemanfaatan, buku ini juga dilengkapi dengan pokok bahasan yang terkait dengan resiko penggunaan teknologi nuklir dan filosofi keselamatan untuk mencegah resiko dari penggunaan teknologi nuklir.

Tujuan penerbitan buku ini adalah untuk pengayaan terhadap buku-buku yang sudah ada dan memberikan tambahan wawasan bidang nuklir bagi siswa SMA, terutama tentang manfaat Iptek nuklir untuk kehidupan. Tentu saja baik isi maupun penggunaan bahasa dari buku ini masih terdapat banyak kelemahan, maka saran dan masukan bagi penyempurnaanya sangat diharapkan.

Daftar Isi

| | |
|---|-----|
| Kata Pengantar | 5 |
| Bab 1 – Atom, Inti dan Radioaktivitas | 9 |
| 1.1. Sejarah Perkembangan Teori Atom dan inti Atom | 9 |
| 1.2. Struktur Atom dan Inti Atom | 12 |
| 1.3. Reaksi Inti | 18 |
| 1.4. Radioaktivitas | 32 |
| 1.5. Interaksi Radiasi Dengan Materi | 39 |
| 1.6. Pengukuran Radiasi | 46 |
| 1.7. Alat Ukur Proteksi Radiasi | 54 |
| 1.8. Sistem Pencacahan dan Spektroskopi | 60 |
| Bab 2 – Pengantar Biologi Radiasi | |
| 2.1. Radiasi dan Kita | 65 |
| 2.2. Efek Radiasi Pada Tubuh | 71 |
| Bab 3 – Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi | |
| 3.1. Reaktor Fusi dan Reaktor Fisi | 78 |
| 3.2. Pemanfaatan Panas | 104 |
| 3.3. Baterai Nuklir | 108 |
| Bab 4 – Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Industri | |
| 4.1. Radiografi Industri | 114 |
| 4.2. Penentuan Keausan Alat | 115 |
| 4.3. Penentuan Homogenitas Proses | 116 |
| 4.4. Pengelolaan Lingkungan | 117 |
| 4.5. Modifikasi Bahan | 120 |
| 4.6. Penanggalan Radiokarbon | 123 |
| Bab 5 – Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Hidrologi | |
| 5.1. Pengukuran Debit Air Sungai | 127 |
| 5.2. Penentuan Arah Gerak Air Tanah | 128 |
| 5.3. Pengukuran Kadar Air Tanah | 128 |
| 5.4. Penentuan Gerakan Sedimen | 129 |
| 5.5. Penentuan Kebocoran Bendungan | 130 |
| 5.6. Penentuan laju Erosi | 130 |
| 5.7. Deteksi Kebocoran | 131 |

| | |
|--|-----|
| Bab 6 – Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Kesehatan | |
| 6.1. Radiodiagnostik | 133 |
| 6.2. Radioterapi | 134 |
| 6.3. Kedokteran Nuklir | 135 |
| 6.4. Sterilisasi Alat dan Produk Kesehatan | 139 |
| 6.5. Bank Jaringan di Indonesia | 142 |
| Bab 7 – Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Pangan | |
| 7.1. Pemuliaan Tanaman | 146 |
| 7.2. Pengendalian Hama Dengan TSM | 151 |
| 7.3. Pengawetan Bahan Pangan | 152 |
| 7.4. Efisiensi Pemupukan | 155 |
| 7.5. Peternakan | 159 |
| Bab 8 – Proteksi Radiasi | |
| 8.1. Organisasi Internasional | 166 |
| 8.2. Filosofi Dasar Proteksi Radiasi | 168 |
| 8.3. Asas-Asas Proteksi Radiasi | 169 |
| 8.4. Budaya Keselamatan | 170 |
| Bab 9 – Proteksi Radiasi Pada Manusia dan Lingkungan | |
| 9.1. Proteksi Radiasi Pada Manusia | 172 |
| 9.2. Proteksi Radiasi Pada Lingkungan | 197 |
| Bab 10 – Pengelolaan Limbah Radioaktif | |
| 10.1. Sumber dan Klasifikasi Limbah Radioaktif | 207 |
| 10.2. Pengelolaan limbah | 208 |
| 10.3. Proses Olah Ulang | 212 |
| Daftar Pustaka | 214 |

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

1.1

Sejarah Perkembangan Teori Atom dan Inti Atom

Sejarah Konsep Atom

Spekulasi paling dini tentang keberadaan atom sebagai pembentuk materi terjadi kira-kira tahun 500 SM pada zaman Yunani Kuno. Terdapat dua aliran pendapat mengenai pembentuk benda yaitu aliran Aristoteles dan aliran Anaxagoras, Leucippus dan Democritus. Aristoteles menyatakan bahwa materi dapat terus menerus dibagi, sedangkan Democritus dkk mempostulasikan bahwa semua materi terbentuk dari kumpulan partikel yang disebut atom, yang berasal dari kata atomos yang berarti tidak dapat dibagi-bagi lagi. Pengetahuan tentang atom ini tidak mengalami perkembangan hingga awal abad 19.

Di awal abad 19 (thn 1808), penelitian mengenai berat gabungan secara kimia oleh John Dalton dan kawan-kawan menunjukkan kebenaran atom sebagai pembentuk materi. Tiga tahun kemudian, Avogadro, profesor fisika di Turin dengan jelas dapat membedakan antara atom dan molekul dan ia menunjukkan bahwa gas yang berbeda namun memiliki volume yang sama berisi jumlah molekul yang sama bila suhu dan tekanannya sama. Hal ini diikuti oleh hipotesis pertama mengenai struktur atom.

Prout, orang Inggris, menyarankan pada tahun 1815 bahwa atom semua elemen tersusun dari atom hidrogen. Hipotesis Prout ini tidak dapat diterima sampai pada akhir abad 19 oleh pengukuran berat atom yang lebih akurat. Nanti setelah penemuan isotop di awal abad 20, hipotesis ini dapat diterima dalam bentuk lain yaitu adanya konsep nomor massa.

Fisika atom modern bermula pada penemuan sinar-X oleh Rontgen pada tahun 1895, penemuan radioaktivitas oleh Becquerel pada tahun 1896, dan penemuan elektron pada tahun 1897 oleh J.J.Thomson. Pengukuran rasio muatan dan massa elektron, oleh Thomson dan penentuan muatan listrik oleh H.A. Wilson (1903) membawa kepada penentuan massa elektron yaitu sekitar 10^{-27} g. Harga muatan elektron bersama dengan hukum elektrolisis Faraday, menunjukkan bahwa berat atom hidrogen sekitar 1800 kali massa elektron. Penelitian Thomson menunjukkan bahwa semua atom

Democritus



John Dalton



J.J. Thomson



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

memiliki elektron dan penelitian Barkla (1911) tentang hamburan sinar-X menunjukkan bahwa jumlah elektron dalam tiap atom (kecuali hidrogen) hampir sama dengan setengah berat atomnya.

Model atom Nagaoka (1904) dengan lintasan elektron yang berputar kurang dapat diterima saat itu berdasarkan teori elektromagnetik klasik. Menurut teori ini, elektron yang berputar terus menerus akan mengeluarkan energi karena percepatan sentripetalnya dan akhirnya akan jatuh ke inti atom bila energinya sudah habis. J.J. Thomson mencoba mengatasi dengan usulan model atom awan bermuatan, di mana baik massa maupun muatan listriknya terdistribusi merata dalam bentuk bola (1907). Gambaran model atom Thompson ini seperti kue kismis. Model atom Thomson tidak dapat menjelaskan eksperimen hamburan partikel alpha oleh air atau lapisan tipis mica (Rutherford 1906), lapisan emas (Geiger 1910) dan lapisan platinum (Geiger dan Marsden 1909).

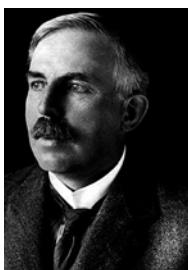
Kemudian Rutherford (1911), mengusulkan bahwa muatan listrik atom (tidak termasuk elektron) terkonsentrasi pada benda yang sangat kecil di tengah. Melalui teori atomnya, Rutherford dapat menjelaskan defleksi partikel alpha yang teramati oleh Geiger dan Marsden.

Setelah keberadaan inti atom bermuatan positif dan susunan elektron di luarnya ditemukan, maka perlu dicari konsep baru untuk mengatasi kelemahan teori elektromagnetik klasik. Bohr (1913) mengusulkan bahwa elektron tidak melepaskan energi saat berputar di lintasannya sendiri. Dengan menggunakan postulasi kuantum Planck, secara teoretis Bohr dapat menjelaskan spektrum atom hidrogen dan menentukan konstanta Rydberg. Sukses ini memastikan model atom Bohr (Rutherford-Bohr) benar.

Model Atom Thomson

Penemuan radioaktivitas oleh Becquerel pada tahun 1896 bersama dengan pembuktian Thomson mengenai keberadaan elektron merupakan sebuah titik awal teori mengenai struktur atom. Telah diketahui bahwa atom suatu bahan radioaktif berubah menjadi atom lain setelah memancarkan partikel bermuatan positif atau negatif, sehingga muncullah pemahaman bahwa atom terdiri dari sesuatu yang bermuatan positif dan negatif. Jika pemahaman ini benar, maka muatan negatif total pada atom harus

Rutherford



Bohr



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

merupakan kelipatan bulat dari muatan elementer elektron. Selain itu, karena atom dalam kondisi normal bersifat netral secara listrik, maka jumlah muatan positif dan negatif dalam atom harus sama. Adanya bukti bahwa atom memancarkan elektron dalam berbagai kondisi menunjukkan bahwa atom pasti memiliki elektron. Dengan demikian diketahui bahwa teori modern mengenai struktur atom pertama kali disusun berdasarkan hipotesis bahwa atom terdiri dari elektron dan partikel bermuatan positif yang belum diketahui namanya saat itu.

Thomson mengusulkan sebuah model atom yang sederhana seperti roti kismis. Menurut model ini atom berbentuk seperti bola dengan muatan listrik terdistribusi merata, dan elektron tersebar pada bola ini dengan jumlah muatan negatif yang sama dengan muatan positif.

Model atom Thomson dapat memprediksi jumlah partikel alpha yang terhambur melalui lapisan tipis untuk sudut kecil saja. Model atom Thomson tidak dapat dipertahankan karena tidak mampu memprediksi jumlah partikel alpha yang terhambur untuk sudut lebar.

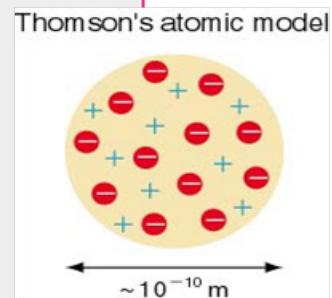
Model Atom Rutherford

Pada tahun 1911 Ernest Rutherford (1871 – 1937) bersama murid-muridnya, Hans Geiger dan Ernest Marsden melakukan eksperimen hamburan partikel alpha yang sangat penting dalam perkembangan model atom. Dalam eksperimennya, partikel alpha ditembakkan ke arah lapisan logam tipis emas.

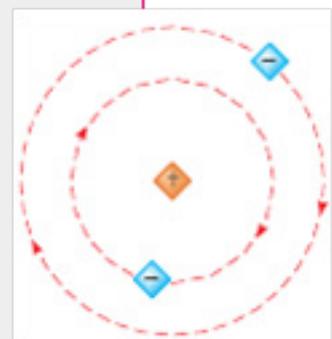
Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sebagian besar partikel alpha melewati lapisan tipis seperti menembus ruang kosong, dan ada juga partikel yang terdefleksi dengan sudut yang lebar. Eksperimen juga menunjukkan bahwa ada partikel yang terpantul kembali ke arah datangnya. Hamburan semacam ini jelas tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan model atom Thomson.

Rutherford menjelaskan hasil eksperimen ini dengan

gambar 1.
Model atom
Thomson



gambar 2.
Model atom
Rutherford



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

mengasumsikan bahwa muatan positif dalam sebuah atom terkonsentrasi pada suatu bagian yang relatif kecil dibanding ukuran atom. Bagian bermuatan positif ini disebut inti (nucleus). Elektron dalam atom diasumsikan berada di luar atom dan bergerak mengelilingi inti atom seperti planet-planet mengelilingi matahari.

Model atom seperti planet ini memiliki kelemahan:

1. Model ini tidak dapat menjelaskan fenomena bahwa atom memancarkan radiasi elektromagnetik karakteristik yang diskret.
2. Menurut teori elektromagnetisme Maxwell, partikel yang berkeliling pada lintasan orbit semacam ini akan mengalami percepatan sentripetal dan memancarkan energi hingga akhirnya akan jatuh ke dalam inti atom.

1.2

Struktur Atom dan Inti Atom

Model Atom Bohr

Semua bahan (materi) yang ada di alam ini selalu tersusun dari berjuta-juta molekul, sedangkan molekul itu sendiri terdiri atas beberapa atom. Sebagai contoh, segelas air minum tersusun atas molekul-molekul H_2O sedang sebuah molekul H_2O terdiri atas dua buah atom hidrogen (dengan lambang H) dan sebuah atom oksigen (dengan lambang O). Jadi, atom dapat didefinisikan sebagai bagian terkecil dari suatu materi yang masih memiliki sifat dasar materi tersebut.

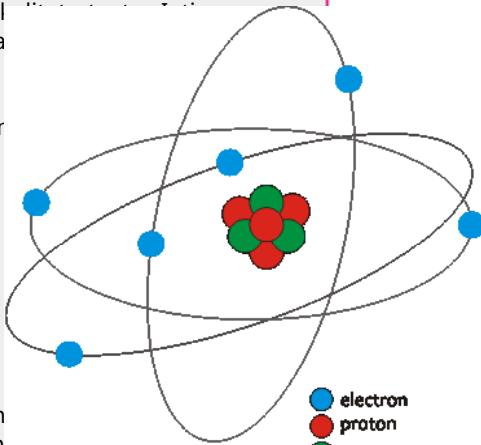
Istilah lain yang sering digunakan untuk menyatakan jenis atom adalah unsur. Sebagai contoh, atom emas sering juga disebut sebagai unsur emas, yang mempunyai pengertian sama. Semua unsur yang telah diketemukan dapat dilihat pada tabel periodik unsur.

Untuk mempelajari struktur atom, sebenarnya terdapat beberapa model pendekatan mulai dari yang sederhana hingga yang sangat rumit (silahkan membaca sejarah perkembangan model atau struktur atom). Model atom

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Bohr merupakan model yang paling sering digunakan karena sederhana tetapi dapat menjelaskan banyak hal. Model atom Bohr ini menggambarkan bahwa atom terdiri atas inti atom dan sejumlah elektron yang mengelilingi inti atom dengan lintasan atau l

gambar 3.
Model atom Bohr



Jenis atom yang sama akan mempunyai jumlah proton yang sama, sebaliknya atom yang berbeda memiliki jumlah proton yang berbeda. Sebagai contoh, unsur hidrogen (H) mempunyai sebuah proton, sedang unsur emas (Au) mempunyai 79 buah proton. Sebagai suatu konvensi, setiap jenis atom diberi nomor – yang disebut sebagai nomor atom – berdasarkan jumlah proton yang dimilikinya. Sebagai contoh, nomor atom unsur hidrogen adalah 1 sedang nomor atom dari unsur emas adalah 79. Jenis-jenis atom yang telah dapat dilihat pada tabel periodik unsur.

gambar 4.
Tabel periodik unsur

| PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|----|-----------|-----------|--------|------|--------|----------|--------|-----|--------|--------|----------|----------|--------|----|--------|----|-------|----|--------|----|-------|----|--------|----|-------|----|--------|----|-------|----|--------|----|-------|----|--------|----|--------|----|--------|----|-------|----|------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|----|-------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|-------|----|--------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| GROUP | | PERIOD | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | IA | IIA | | IIIA | | | | IIB | | IIIB | | | | IVA | | VA | | VIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Li | B | Be | Boron | | | | MAGNESIUM | | | | ALUMINUM | | | | CARBON | | NITROGEN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Na | Mg | SODIUM | | | | MAGNESIUM | | | | BORON | | | | OXYGEN | | FLUORINE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 22.990 | 20 | 40.076 | 21 | 44.956 | 22 | 47.867 | 23 | 50.942 | 24 | 51.996 | 25 | 54.938 | 26 | 55.845 | 27 | 58.933 | 28 | 58.683 | 29 | 63.546 | 30 | 65.39 | 31 | 69.723 | 32 | 72.64 | 33 | 74.922 | 34 | 78.96 | 35 | 79.904 | 36 | 83.80 | 37 | 85.468 | 38 | 87.62 | 39 | 88.906 | 40 | 91.224 | 41 | 92.996 | 42 | 95.94 | 43 | (96) | 44 | 101.07 | 45 | 102.91 | 46 | 106.42 | 47 | 107.87 | 48 | 112.41 | 49 | 114.82 | 50 | 118.71 | 51 | 121.76 | 52 | 127.60 | 53 | 126.90 | 54 | 131.29 | 55 | 132.91 | 56 | 137.33 | 57 | 148.949 | 58 | 149.055 | 59 | 149.183 | 60 | 149.211 | 61 | (145) | 62 | 150.36 | 63 | 151.96 | 64 | 157.25 | 65 | 158.93 | 66 | 162.50 | 67 | 164.93 | 68 | 167.26 | 69 | 168.93 | 70 | 173.04 | 71 | 174.97 | 72 | 178.49 | 73 | 180.95 | 74 | 183.84 | 75 | 186.21 | 76 | 190.23 | 77 | 192.22 | 78 | 195.05 | 79 | 196.97 | 80 | 200.59 | 81 | 204.38 | 82 | 207.2 | 83 | 209.86 | 84 | (209) | 85 | (210) | 86 | (222) | 87 | (223) | 88 | (226) | 89 | 103 | 104 | (261) | 105 | (262) | 106 | (266) | 107 | (264) | 108 | (277) | 109 | (268) | 110 | (281) | 111 | (272) | 112 | (285) | 114 | (289) | 115 | (291) | 116 | (293) | 117 | (295) | 118 | (297) | 119 | (299) | 120 | (301) | 121 | (303) | 122 | (305) | 123 | (307) | 124 | (309) | 125 | (311) | 126 | (313) | 127 | (315) | 128 | (317) | 129 | (319) | 130 | (321) | 131 | (323) | 132 | (325) | 133 | (327) | 134 | (329) | 135 | (331) | 136 | (333) | 137 | (335) | 138 | (337) | 139 | (339) | 140 | (341) | 141 | (343) | 142 | (345) | 143 | (347) | 144 | (349) | 145 | (351) | 146 | (353) | 147 | (355) | 148 | (357) | 149 | (359) | 150 | (361) | 151 | (363) | 152 | (365) | 153 | (367) | 154 | (369) | 155 | (371) | 156 | (373) | 157 | (375) | 158 | (377) | 159 | (379) | 160 | (381) | 161 | (383) | 162 | (385) | 163 | (387) | 164 | (389) | 165 | (391) | 166 | (393) | 167 | (395) | 168 | (397) | 169 | (399) | 170 | (401) | 171 | (403) | 172 | (405) | 173 | (407) | 174 | (409) | 175 | (411) | 176 | (413) | 177 | (415) | 178 | (417) | 179 | (419) | 180 | (421) | 181 | (423) | 182 | (425) | 183 | (427) | 184 | (429) | 185 | (431) | 186 | (433) | 187 | (435) | 188 | (437) | 189 | (439) | 190 | (441) | 191 | (443) | 192 | (445) | 193 | (447) | 194 | (449) | 195 | (451) | 196 | (453) | 197 | (455) | 198 | (457) | 199 | (459) | 200 | (461) | 201 | (463) | 202 | (465) | 203 | (467) | 204 | (469) | 205 | (471) | 206 | (473) | 207 | (475) | 208 | (477) | 209 | (479) | 210 | (481) | 211 | (483) | 212 | (485) | 213 | (487) | 214 | (489) | 215 | (491) | 216 | (493) | 217 | (495) | 218 | (497) | 219 | (499) | 220 | (501) | 221 | (503) | 222 | (505) | 223 | (507) | 224 | (509) | 225 | (511) | 226 | (513) | 227 | (515) | 228 | (517) | 229 | (519) | 230 | (521) | 231 | (523) | 232 | (525) | 233 | (527) | 234 | (529) | 235 | (531) | 236 | (533) | 237 | (535) | 238 | (537) | 239 | (539) | 240 | (541) | 241 | (543) | 242 | (545) | 243 | (547) | 244 | (549) | 245 | (551) | 246 | (553) | 247 | (555) | 248 | (557) | 249 | (559) | 250 | (561) | 251 | (563) | 252 | (565) | 253 | (567) | 254 | (569) | 255 | (571) | 256 | (573) | 257 | (575) | 258 | (577) | 259 | (579) | 260 | (581) | 261 | (583) | 262 | (585) | 263 | (587) | 264 | (589) | 265 | (591) | 266 | (593) | 267 | (595) | 268 | (597) | 269 | (599) | 270 | (601) | 271 | (603) | 272 | (605) | 273 | (607) | 274 | (609) | 275 | (611) | 276 | (613) | 277 | (615) | 278 | (617) | 279 | (619) | 280 | (621) | 281 | (623) | 282 | (625) | 283 | (627) | 284 | (629) | 285 | (631) | 286 | (633) | 287 | (635) | 288 | (637) | 289 | (639) | 290 | (641) | 291 | (643) | 292 | (645) | 293 | (647) | 294 | (649) | 295 | (651) | 296 | (653) | 297 | (655) | 298 | (657) | 299 | (659) | 300 | (661) | 301 | (663) | 302 | (665) | 303 | (667) | 304 | (669) | 305 | (671) | 306 | (673) | 307 | (675) | 308 | (677) | 309 | (679) | 310 | (681) | 311 | (683) | 312 | (685) | 313 | (687) | 314 | (689) | 315 | (691) | 316 | (693) | 317 | (695) | 318 | (697) | 319 | (699) | 320 | (701) | 321 | (703) | 322 | (705) | 323 | (707) | 324 | (709) | 325 | (711) | 326 | (713) | 327 | (715) | 328 | (717) | 329 | (719) | 330 | (721) | 331 | (723) | 332 | (725) | 333 | (727) | 334 | (729) | 335 | (731) | 336 | (733) | 337 | (735) | 338 | (737) | 339 | (739) | 340 | (741) | 341 | (743) | 342 | (745) | 343 | (747) | 344 | (749) | 345 | (751) | 346 | (753) | 347 | (755) | 348 | (757) | 349 | (759) | 350 | (761) | 351 | (763) | 352 | (765) | 353 | (767) | 354 | (769) | 355 | (771) | 356 | (773) | 357 | (775) | 358 | (777) | 359 | (779) | 360 | (781) | 361 | (783) | 362 | (785) | 363 | (787) | 364 | (789) | 365 | (791) | 366 | (793) | 367 | (795) | 368 | (797) | 369 | (799) | 370 | (801) | 371 | (803) | 372 | (805) | 373 | (807) | 374 | (809) | 375 | (811) | 376 | (813) | 377 | (815) | 378 | (817) | 379 | (819) | 380 | (821) | 381 | (823) | 382 | (825) | 383 | (827) | 384 | (829) | 385 | (831) | 386 | (833) | 387 | (835) | 388 | (837) | 389 | (839) | 390 | (841) | 391 | (843) | 392 | (845) | 393 | (847) | 394 | (849) | 395 | (851) | 396 | (853) | 397 | (855) | 398 | (857) | 399 | (859) | 400 | (861) | 401 | (863) | 402 | (865) | 403 | (867) | 404 | (869) | 405 | (871) | 406 | (873) | 407 | (875) | 408 | (877) | 409 | (879) | 410 | (881) | 411 | (883) | 412 | (885) | 413 | (887) | 414 | (889) | 415 | (891) | 416 | (893) | 417 | (895) | 418 | (897) | 419 | (899) | 420 | (901) | 421 | (903) | 422 | (905) | 423 | (907) | 424 | (909) | 425 | (911) | 426 | (913) | 427 | (915) | 428 | (917) | 429 | (919) | 430 | (921) | 431 | (923) | 432 | (925) | 433 | (927) | 434 | (929) | 435 | (931) | 436 | (933) | 437 | (935) | 438 | (937) | 439 | (939) | 440 | (941) | 441 | (943) | 442 | (945) | 443 | (947) | 444 | (949) | 445 | (951) | 446 | (953) | 447 | (955) | 448 | (957) | 449 | (959) | 450 | (961) | 451 | (963) | 452 | (965) | 453 | (967) | 454 | (969) | 455 | (971) | 456 | (973) | 457 | (975) | 458 | (977) | 459 | (979) | 460 | (981) | 461 | (983) | 462 | (985) | 463 | (987) | 464 | (989) | 465 | (991) | 466 | (993) | 467 | (995) | 468 | (997) | 469 | (999) | 470 | (1001) | 471 | (1003) | 472 | (1005) | 473 | (1007) | 474 | (1009) | 475 | (1011) | 476 | (1013) | 477 | (1015) | 478 | (1017) | 479 | (1019) | 480 | (1021) | 481 | (1023) | 482 | (1025) | 483 | (1027) | 484 | (1029) | 485 | (1031) | 486 | (1033) | 487 | (1035) | 488 | (1037) | 489 | (1039) | 490 | (1041) | 491 | (1043) | 492 | (1045) | 493 | (1047) | 494 | (1049) | 495 | (1051) | 496 | (1053) | 497 | (1055) | 498 | (1057) | 499 | (1059) | 500 | (1061) | 501 | (1063) | 502 | (1065) | 503 | (1067) | 504 | (1069) | 505 | (1071) | 506 | (1073) | 507 | (1075) | 508 | (1077) | 509 | (1079) | 510 | (1081) | 511 | (1083) | 512 | (1085) | 513 | (1087) | 514 | (1089) | 515 | (1091) | 516 | (1093) | 517 | (1095) | 518 | (1097) | 519 | (1099) | 520 | (1101) | 521 | (1103) | 522 | (1105) | 523 | (1107) | 524 | (1109) | 525 | (1111) | 526 | (1113) | 527 | (1115) | 528 | (1117) | 529 | (1119) | 530 | (1121) | 531 | (1123) | 532 | (1125) | 533 | (1127) | 534 | (1129) | 535 | (1131) | 536 | (1133) | 537 | (1135) | 538 | (1137) | 539 | (1139) | 540 | (1141) | 541 | (1143) | 542 | (1145) | 543 | (1147) | 544 | (1149) | 545 | (1151) | 546 | (1153) | 547 | (1155) | 548 | (1157) | 549 | (1159) | 550 | (1161) | 551 | (1163) | 552 | (1165) | 553 | (1167) | 554 | (1169) | 555 | (1171) | 556 | (1173) | 557 | (1175) | 558 | (1177) | 559 | (1179) | 560 | (1181) | 561 | (1183) | 562 | (1185) | 563 | (1187) | 564 | (1189) | 565 | (1191) | 566 | (1193) | 567 | (1195) | 568 | (1197) | 569 | (1199) | 570 | (1201) | 571 | (1203) | 572 | (1205) | 573 | (1207) | 574 | (1209) | 575 | (1211) | 576 | (1213) | 577 | (1215) | 578 | (1217) | 579 | (1219) | 580 | (1221) | 581 | (1223) | 582 | (1225) | 583 | (1227) | 584 | (1229) | 585 | (1231) | 586 | (1233) | 587 | (1235) | 588 | (1237) | 589 | (1239) | 590 | (1241) | 591 | (1243) | 592 | (1245) | 593 | (1247) | 594 | (1249) | 595 | (1251) | 596 | (1253) | 597 | (1255) | 598 | (1257) | 599 | (1259) | 600 | (1261) | 601 | (1263) | 602 | (1265) | 603 | (1267) | 604 | (1269) | 605 | (1271) | 606 | (1273) | 607 | (1275) | 608 | (1277) | 609 | (1279) | 610 | (1281) | 611 | (1283) | 612 | (1285) | 613 | (1287) | 614 | (1289) | 615 | (1291) | 616 | (1293) | 617 | (1295) | 618 | (1297) | 619 | (1299) | 620 | (1301) | 621 | (1303) | 622 | (1305) | 623 | (1307) | 624 | (1309) | 625 | (1311) | 626 | (1313) | 627 | (1315) | 628 | (1317) | 629 | (1319) | 630 | (1321) | 631 | (1323) | 632 | (1325) | 633 | (1327) | 634 | (1329) | 635 | (1331) | 636 | (1333) | 637 | (1335) | 638 | (1337) | 639 | (1339) | 640 | (1341) | 641 | (1343) | 642 | (1345) | 643 | (1347) | 644 | (1349) | 645 | (1351) | 646 | (1353) | 647 | (1355) | 648 | (1357) | 649 | (1359) | 650 | (1361) | 651 | (1363) | 652 | (1365) | 653 | (1367) | 654 | (1369) | 655 | (1371) | 656 | (1373) | 657 | (1375) | 658 | (1377) | 659 | (1379) | 660 | (1381) | 661 | (1383) | 662 | (1385) | 663 | (1387) | 664 | (1389) | 665 | (1391) | 666 | (1393) | 667 | (1395) | 668 | (1397) | 669 | (1399) | 670 | (1401) | 671 | (1403) | 672 | (1405) | 673 |

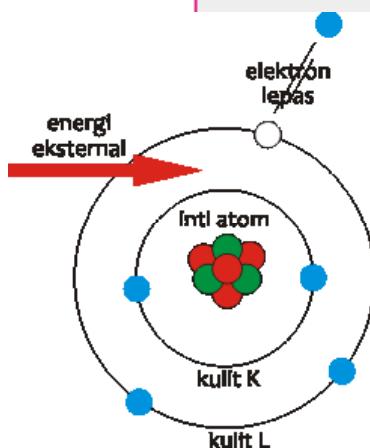
Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Muatan dan massa dari partikel penyusun atom

Karakteristik partikel penyusun atom terdapat pada tabel berikut ini. Terlihat bahwa berat (atau massa) atom terkonsentrasi pada intinya, karena berat elektron sangat ringan bila dibandingkan dengan berat proton dan neutron ($\approx 1 / 2.000$ kali).

| Partikel | Muatan Listrik Coulomb | Muatan Listrik Elementer | Massa Kg | smu* |
|-----------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------|
| Elektron | $-1,6 \times 10^{-19}$ | -1 | $9,1 \times 10^{-31}$ | 0 |
| Proton | $+1,6 \times 10^{-19}$ | +1 | $1,67 \times 10^{-27}$ | 0 |
| Neutron | 0 | 0 | $1,67 \times 10^{-27}$ | 1 |

smu* adalah singkatan dari satuan massa atom.



gambar 5.
Proses ionisasi

Transisi Elektron

Berdasarkan hukum elektrostatik (Coulomb), muatan positif dan muatan negatif akan saling tarik menarik sehingga elektron-elektron di dalam sebuah atom akan tertarik ke inti atom akan tetapi dengan adanya "hukum-

Muatan atom secara alamiah netral, sehingga jumlah proton dan elektron di dalam suatu atom sama. Sebagai contoh, unsur emas (No. atom 79) mempunyai 79 buah proton dan 79 buah elektron. Dengan adanya interaksi energi eksternal, terdapat kemungkinan bahwa jumlah proton dan elektron suatu atom tidak sama sehingga muatan atom tersebut tidak netral. Atom yang tidak netral (bermuatan) disebut sebagai ion (partikel yang bermuatan listrik).

Proses ionisasi adalah peristiwa lepasnya elektron dari lintasannya karena terdapat energi eksternal yang mengenai suatu atom. Setelah peristiwa ini, atom akan bermuatan positif atau dapat disebut sebagai ion positif. Proses ionisasi dapat terjadi bila energi eksternal yang datang lebih besar daripada daya ionisasi atom tersebut.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

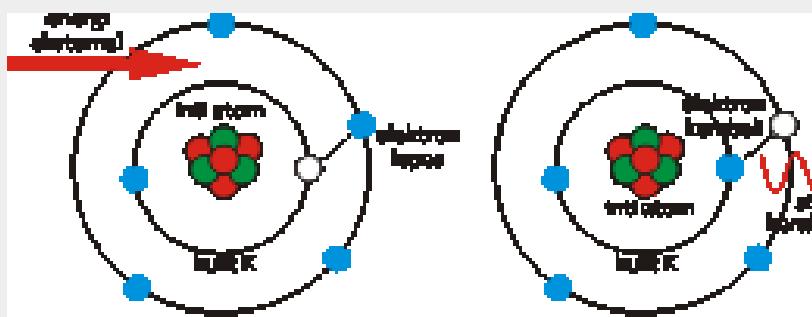
hukum" yang lain ternyata elektron-elektron di dalam atom harus menepati lintasan atau orbit tertentu, dan setiap lintasan mempunyai kapasitas tertentu. Lintasan paling dalam (kulit K) dapat ditempati maksimum 2 elektron, sedangkan lintasan berikutnya (kulit L) dapat ditempati maksimum 8 elektron, dan seterusnya.

Terdapat kemungkinan terjadi perpindahan elektron dari satu lintasan ke lintasan yang lain (selama masih ada tempat), yang disebut sebagai transisi elektron. Transisi elektron dari lintasan yang lebih dalam ke lintasan yang lebih luar akan membutuhkan energi dan disebut sebagai proses eksitasi, sebaliknya untuk transisi dari lintasan luar ke lintasan yang lebih dalam akan memancarkan energi dalam bentuk sinar-X karakteristik.

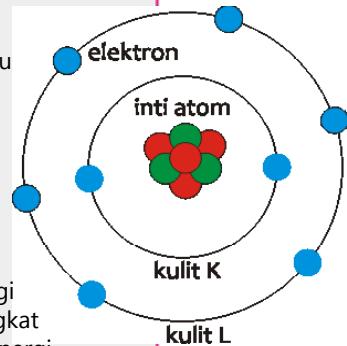
Proses eksitasi dari kulit K ke kulit L dapat terjadi bila energi eksternal yang mengenai atom lebih besar daripada selisih tingkat energi antara kulit K dan kulit L atom tersebut. Sedangkan energi sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh atom yang tereksitasi juga "sama" dengan selisih tingkat energi kulit asal dan kulit tujuan. Catatan: satuan energi yang digunakan pada pembahasan fisika radiasi ini (mikroskopik) adalah eV (elektron Volt), dimana

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

dengan beberapa multiplikasinya seperti keV (kilo eV = 1.000 eV) dan MeV (Mega eV = 1.000.000 eV).



gambar 6.
Sejumlah elektron
di dalam sebuah
atom



gambar 7.
Proses eksitasi
(kiri) dan
pembentukan
sinar-X
karakteristik
(kanan)

Inti Atom

Inti atom atau nuklir (nuclear) terdiri atas sejumlah proton dan neutron dengan komposisi tertentu. Di dalam inti atom ini juga berlaku "hukum" lain, yaitu gaya nuklir, yang dapat mengimbangi gaya elektrostatis yang disebabkan oleh proton. Komposisi jumlah proton dan neutron di dalam inti atom tersebut menentukan apakah suatu inti atom bersifat stabil atau tidak stabil.

Terdapat kemungkinan bahwa beberapa atom (unsur) yang sama ternyata mempunyai inti atom yang tidak sama, dalam arti jumlah neutron yang tidak sama meskipun dengan jumlah proton yang sama. Inti atom dituliskan dengan kaidah sebagai berikut.



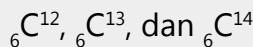
Dimana Z adalah nomor atom yang menunjukkan jumlah proton, X adalah simbol unsur, dan A adalah nomor massa yang menunjukkan jumlah proton + neutron. Sebagai contoh



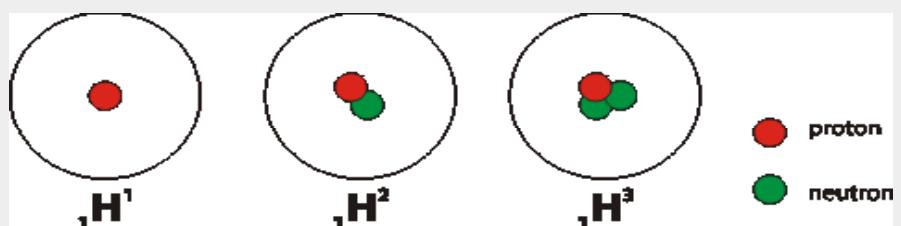
adalah inti atom Kobalt yang memiliki 27 proton (no. atom 27) dan memiliki 33 neutron (no. massa 60 – no. atom). Karena nomor atom dan lambang atom (unsur) merupakan satu identitas (nomor atom 6 sudah pasti adalah unsur C) maka penulisan inti atom sering disingkat hanya lambang dan nomor massanya saja, misalnya



Inti-inti atom dari unsur yang sama tetapi memiliki jumlah neutron yang berbeda disebut sebagai isotop. Sebagai contoh isotop Karbon:



gambar 8.
Isotop
Hidrogen



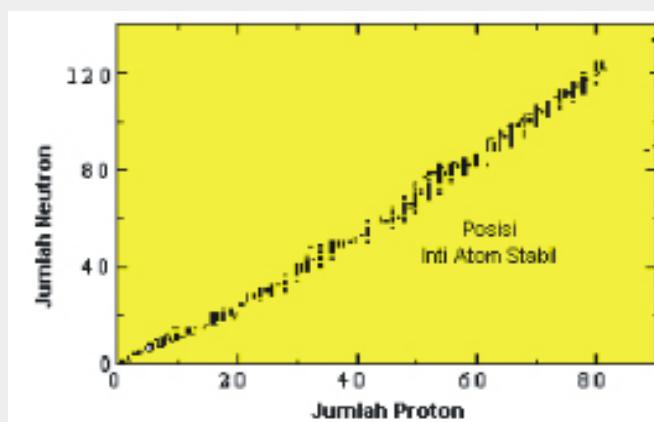
Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Kestabilan Inti Atom

Berdasarkan hukum Coulomb inti atom akan “pecah” karena adanya gaya tolak menolak antara dua proton, akan tetapi ternyata di dalam inti atom terdapat gaya lain yang mengimbangi gaya Coulomb yaitu gaya nuklir. Kekuatan gaya nuklir ini sangat ditentukan oleh jumlah partikel nukleonik (proton dan neutron) di dalam inti atom. Oleh karena itu, keseimbangan antara kekuatan gaya Coulomb dan gaya nuklir di dalam inti atom tersebut sangat dipengaruhi oleh komposisi jumlah proton dan jumlah neutronnya.

Secara umum memang sering dikatakan bahwa inti atom yang stabil adalah bila jumlah proton dan jumlah neutronnya sama untuk inti ringan sedangkan untuk inti berat jumlah neutronnya satu setengah kali jumlah protonnya. Pernyataan tersebut di atas tidak dapat dibenarkan secara ilmiah karena pada nyataannya seringkali tidak mengikuti ketentuan itu.

Posisi inti atom yang stabil sudah dipetakan dengan sistem koordinat jumlah proton (sumbu-X) dan jumlah neutron (sumbu-Y) sebagaimana kurva kestabilan pada gambar berikut.



gambar 9.
Peta (kurva)
kestabilan inti
atom

Titik-titik hitam pada kurva tersebut di atas menunjukkan koordinat (jumlah proton dan jumlah neutron) inti atom yang stabil. Terlihat bahwa pada jumlah proton tertentu terdapat beberapa titik hitam dengan jumlah

neutron yang berbeda, berarti terdapat kemungkinan bahwa sebuah unsur memiliki beberapa isotop yang stabil.



gambar 10.
Sebagian dari
tabel nuklida

Kurva kestabilan di atas dijabarkan lebih rinci pada suatu tabel yang disebut sebagai tabel nuklida. Jenis-jenis inti atom (nuklida), baik yang stabil maupun yang tidak stabil, dapat dilihat pada tabel nuklida (nuclide chart). Inti atom yang stabil ditandai dengan warna hitam sedangkan warna lain menunjukkan inti atom (nuklida) yang tidak stabil.

Sebagai contoh, terlihat pada tabel nuklida di atas bahwa unsur besi (Fe) mempunyai tiga isotop yang stabil yaitu Besi-56 (Fe-56), Besi-57(Fe-57), dan Besi-58 (Fe-58) serta beberapa inti atom atau isotop yang tidak stabil, yang sering disebut sebagai radioisotop atau inti radioaktif. Demikian pula cara untuk mengidentifikasi kestabilan inti atom pada unsur-unsur yang lain.

1.3 Reaksi Inti

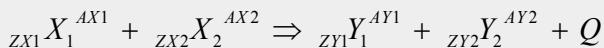
Reaksi inti atau reaksi nuklir adalah proses tumbukan dua inti atau dua partikel inti yang menghasilkan inti atau partikel inti yang berbeda dari asalnya. Pada dasarnya, tumbukan partikel dapat saja terjadi dengan melibatkan tiga partikel atau lebih, tetapi karena sangat sulit menemui kasus dimana tiga atau lebih partikel yang berada dalam satu tempat dan satu lokasi yang sama, maka probabilitas proses tumbukan seperti itu sangat kecil dan jarang terjadi.

Sebuah partikel dapat menyebabkan reaksi nuklir spontan yang menghasilkan proses yang memancarkan sinar radioaktif atau disebut peluruhan radioaktif. Partikel inti dapat saja bertumbukan tanpa mengalami perubahan. Proses ini tidak dapat dikategorikan sebagai reaksi nuklir, melainkan hanya disebut

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

sebagai tumbukan elastik partikel inti. Gambar berikut ini menunjukkan salah satu contoh dari reaksi nuklir.

Reaksi nuklir dari dua inti atau partikel inti X_1 dan X_2 yang menghasilkan partikel inti baru Y_1 dan Y_2 dapat dituliskan dalam suatu persamaan reaksi sebagai berikut :



Dengan A dan Z adalah nomor massa dan nomor atom dari masing-masing partikel inti, dan Q adalah sejumlah energi yang menyertai hasil-hasil reaksi nuklir. Q dapat bernilai positif, yang berarti reaksi nuklir membebaskan sejumlah energi (reaksi eksotermis), atau bernilai negatif yang mempunyai arti reaksi nuklir menyerap atau memerlukan sejumlah energi (reaksi endotermis). Nilai Q dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$Q = (M\{{}_{ZX1}X_1^{AX1}\} + M\{{}_{ZX2}X_2^{AX2}\} - M\{{}_{ZY1}Y_1^{AY1}\} - M\{{}_{ZY2}Y_2^{AY2}\})c^2$$

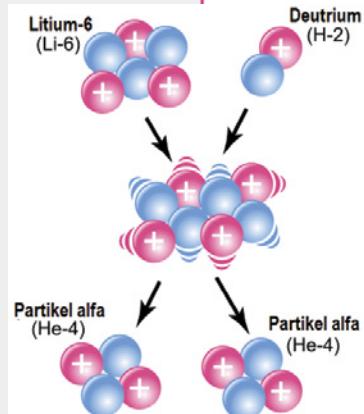
Pada persamaan di atas M adalah massa diam dari partikel inti dan c adalah konstanta kecepatan cahaya. Nilai dari

$$Q = (M\{{}_{ZX1}X_1^{AX1}\} + M\{{}_{ZX2}X_2^{AX2}\} - M\{{}_{ZY1}Y_1^{AY1}\} - M\{{}_{ZY2}Y_2^{AY2}\})$$

adalah selisih massa diam (*mass defect*) partikel-partikel inti sebelum dan sesudah reaksi nuklir. Dalam suatu reaksi nuklir berlaku hukum kekekalan energi, kekekalan muatan partikel, kekekalan jumlah nukleon dan kekekalan momentum. Mengacu pada persamaan reaksi nuklir di atas, kekekalan energi, muatan partikel, nukleon dan momentum dapat dijelaskan dengan penjabaran persamaan berikut ini.

Kekekalan energi:

$$(M\{{}_{ZX1}X_1^{AX1}\} + M\{{}_{ZX2}X_2^{AX2}\})c^2 = (M\{{}_{ZY1}Y_1^{AY1}\} + M\{{}_{ZY2}Y_2^{AY2}\})c^2 + Q$$



gambar 11.
Contoh reaksi
inti (reaksi nuklir)
litium-6 dan
deuterium

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Persamaan ini mempunyai arti bahwa energi sebelum dan sesudah reaksi nuklir terjadi adalah kekal atau tetap.

$$\text{Kekekalan muatan partikel : } Z_{X_1} + Z_{X_2} = Z_{Y_1} + Z_{Y_2}$$

Persamaan ini mempunyai arti bahwa jumlah muatan partikel dari partikel-partikel inti sebelum dan sesudah reaksi nuklir berlangsung adalah kekal atau tetap.

$$\text{Kekekalan nukleon : } A_{X_1} + A_{X_2} = A_{Y_1} + A_{Y_2}$$

Persamaan ini mempunyai arti bahwa jumlah nukleon (sub partikel dalam inti atom yang jumlahnya ditunjukkan dengan nomor massa) dari partikel-partikel inti sebelum dan sesudah reaksi sama. Nukleon atau sub partikel dalam inti atom terdiri dari proton dan neutron.

$$\text{Kekekalan momentum : } \vec{P}_{X_1} + \vec{P}_{X_2} = \vec{P}_{Y_1} + \vec{P}_{Y_2}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa jumlah vektor momentum dari partikel-partikel inti sebelum dan sesudah reaksi nuklir berlangsung adalah kekal atau tetap.

Reaksi inti atau reaksi nuklir sangat berbeda dengan reaksi kimia. Reaksi kimia tidak mengubah struktur dan susunan inti atom, sedangkan reaksi nuklir terkait dengan perubahan struktur inti atom. Reaksi kimia pada dasarnya hanya menyentuh struktur atom bagian luar, yaitu pada tingkatan elektron saja. Oleh karena itu, energi yang dihasilkan (jika reaksi nuklirnya eksotermis) atau yang diserap (jika reaksi nuklirnya endotermis) dalam reaksi nuklir jauh lebih besar jika dibandingkan dengan reaksi kimia. Orde energi yang dihasilkan atau diserap dalam reaksi kimia hanya pada tingkat ukuran elektron volt (eV), dan untuk reaksi nuklir ukuran energinya bisa mencapai mega elektron volt (MeV).

Dua partikel inti yang saling bertumbukan akan menghasilkan beberapa kemungkinan. Bila dua partikel inti yang bertumbukan berukuran lebih kurang sama ringan, maka kedua partikel dapat bergabung menjadi inti yang lebih berat, reaksi seperti ini disebut reaksi fusi atau reaksi penggabungan.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Dalam suatu kasus, dapat saja kedua partikel inti mempunyai perbedaan berat yang sangat signifikan, dalam tumbuhan partikel inti berat akan terpecah menjadi beberapa bagian, reaksi ini disebut reaksi fisi, atau reaksi pembelahan. Dalam kasus ini, dapat terjadi reaksi lain, yaitu partikel inti berat yang ditumbuk oleh partikel inti ringan tidak terbelah hanya menangkap partikel inti ringan yang menumbuknya dan kemudian terjadi perubahan struktur dalam inti atom sehingga terjadi perubahan atom menjadi unsur lain. Reaksi nuklir ini disebut reaksi transmutasi inti. Beragam reaksi nuklir telah berhasil diamati oleh para ilmuwan, tetapi secara umum dapat digolongkan menjadi empat tipe saja yaitu, reaksi fisi, reaksi fusi, peluruhan radioaktif dan transmutasi inti (atau transmutasi nuklir). Bagian berikut ini akan membahas tentang keempat tipe reaksi nuklir tersebut.

uklir).

Peluruhan Radioaktif

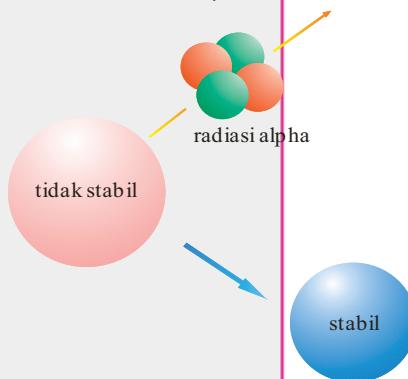
Satu inti atom yang tidak stabil (radioisotop atau inti radioaktif) secara spontan akan berubah menjadi inti atom lain yang lebih stabil sambil memancarkan energi radiasi. Radiasi yang dipancarkan tersebut dapat berupa partikel alpha (α), partikel beta (β), atau sinar gamma (γ).

Peluruhan Alpha (α)

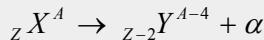
Peluruhan alpha dominan terjadi pada inti-inti tidak stabil yang relatif berat (nomor atom lebih besar dari 80). Dalam peluruhan ini akan dipancarkan partikel alpha (α), yaitu suatu partikel yang terdiri atas dua proton dan dua neutron. Partikel α mempunyai massa 4 sama dan muatan 2 muatan elementer positif. Partikel α secara simbolik dinyatakan dengan simbol ${}^4_2\text{He}$ karena identik dengan inti atom Helium.

Inti atom yang melakukan peluruhan α akan kehilangan dua proton dan dua neutron serta membentuk nuklida baru.

gambar 12.
Peluruhan Alpha



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas



Contoh peluruhan partikel Alpha yang terjadi di alam adalah:



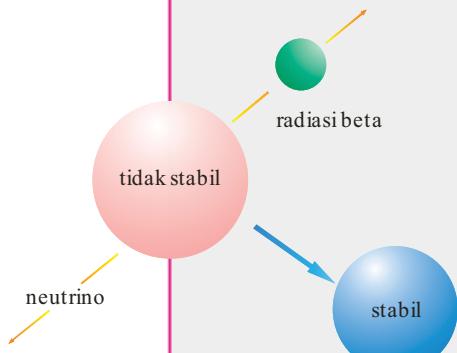
Sifat Radiasi Alpha

- + Daya ionisasi partikel α sangat besar, ± 100 kali daya ionisasi partikel β dan 10.000 kali daya ionisasi sinar γ
- + Jarak jangkauan (daya tembus) nya sangat pendek, hanya beberapa mm udara, bergantung pada energinya.
- + Partikel α akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.
- + Kecepatan partikel α bervariasi antara 1/100 hingga 1/10 kecepatan cahaya.

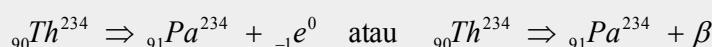
Peluruhan Beta (β)

Peluruhan beta terjadi pada inti tidak stabil yang relatif ringan. Dalam peluruhan ini akan dipancarkan partikel beta yang mungkin bermuatan negatif (β^-) atau bermuatan positif (β^+). Partikel β^- identik dengan elektron sedangkan partikel β^+ identik dengan elektron yang bermuatan positif atau positron.

Dalam proses peluruhan β^- terjadi perubahan neutron menjadi proton di dalam inti atom. Proses peluruhan ini dapat dituliskan sebagai persamaan inti berikut.

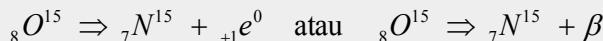


gambar 13.
Peluruhan Beta



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Sedangkan dalam proses peluruhan β^+ terjadi perubahan proton menjadi neutron di dalam inti atom. proses peluruhan ini dapat dituliskan sebagai persamaan inti berikut



Neutrino (ν) dan antineutrino ($\bar{\nu}$) adalah "partikel" yg tidak bermassa tetapi berenergi yang selalu mengiringi peluruhan β .

Sifat Radiasi Beta

- + Daya ionisasinya di udara 1/100 kali dari partikel α
- + Jarak jangkauannya lebih jauh daripada partikel α , dapat menembus beberapa cm di udara.
- + Kecepatan partikel β berkisar antara 1/100 hingga 99/100 kecepatan cahaya.
- + Karena sangat ringan, maka partikel β mudah sekali dihamburkan jika melewati medium.
- + Partikel β akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.

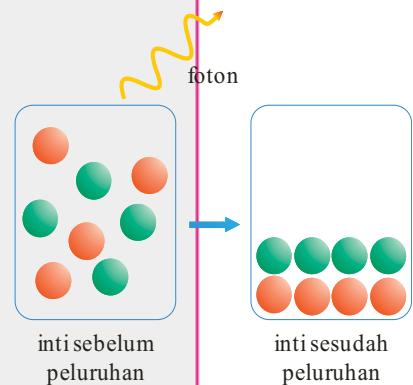
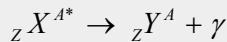
gambar 14.
Peluruhan
Gamma

Peluruhan Gamma (γ)

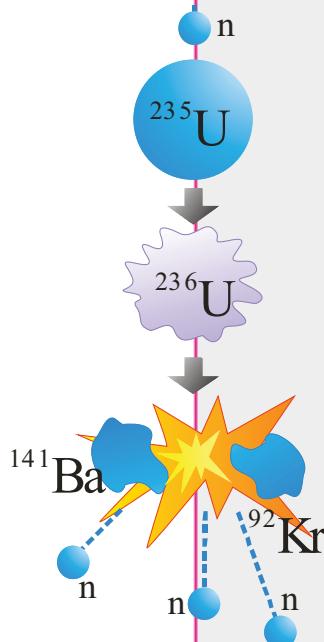
Berbeda dengan dua jenis peluruhan sebelumnya, peluruhan gamma tidak menyebabkan perubahan nomor atom maupun nomor massa, karena radiasi yang dipancarkan dalam peluruhan ini berupa gelombang elektromagnetik (foton).

Peluruhan ini dapat terjadi bila energi inti atom tidak berada pada keadaan dasar (*ground state*), atau sering dikatakan sebagai inti atom yang tereksitasi (*excited state*). Biasanya, peluruhan γ ini mengikuti peluruhan α ataupun β .

Peluruhan γ dapat dituliskan sebagai berikut.



gambar 15.
Reaksi fisi
uranium-235



Reaksi Fisi

Telah dikemukakan pada bagian sebelumnya bahwa terdapat empat tipe umum reaksi nuklir, yaitu reaksi fisi, reaksi fusi, transmutasi inti dan peluruhan radioaktif. Dari empat tipe reaksi nuklir tersebut, reaksi fusi dan reaksi fisi adalah dua reaksi nuklir yang cukup dikenal karena aplikasinya yang sangat fenomenal di bidang militer pada saat perang dingin antara Amerika Serikat dan Uni Soviet. Pembahasan reaksi nuklir berikut ini akan didominasi oleh dua reaksi nuklir fenomenal itu. Walaupun demikian, dua reaksi nuklir lain juga akan dijelaskan secara umum.

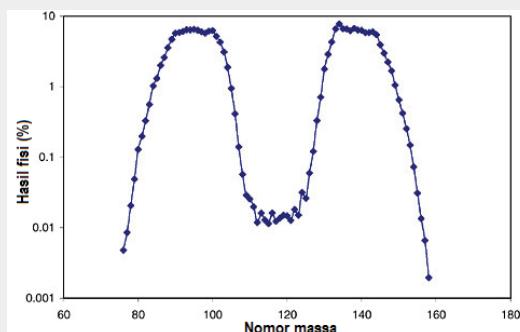
Reaksi fisi adalah proses reaksi nuklir yang terjadi karena inti atom terbelah menjadi partikel-partikel inti yang lebih ringan karena tertumbuk oleh partikel inti lain. Reaksi fisi adalah reaksi nuklir eksotermis yang akan menghasilkan partikel inti yang lebih ringan (sering disebut produk fisi), beberapa partikel neutron, gelombang elektromagnetik dalam bentuk sinar gamma, dan sejumlah energi. Gambar berikut ini melukiskan proses reaksi fisi dari inti atom Uranium-235 (U-235) yang tertumbuk oleh sebuah neutron dengan kecepatan rendah

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

(neutron kecepatan rendah sering disebut sebagai neutron termal). Reaksi fisi Uranium-235 (^{235}U) menghasilkan produk fisi berupa Barium-141 (^{141}Ba) dan Kripton-92(^{92}Kr), tiga buah neutron cepat (masing-masing neutron memiliki energi kinetik~2 MeV), dan sejumlah energi.



Produk fisi dari reaksi fisi Uranium-235 bisa saja tidak berupa Barium-141 (^{141}Ba) dan Kripton-92 (^{92}Kr), tetapi Barium-144 (^{144}Ba) dan Kripton-90 (^{90}Kr), atau Zirkonium-94 (^{94}Zr) dan Telurium-139 (^{139}Te). Probabilitas terbentuknya partikel inti dalam reaksi fisi Uranium-235 (^{235}U) ditunjukkan pada gambar berikut ini.



gambar 16.
Probabilitas
pembentukan
produk fisi
dari reaksi fisi
uranium-235

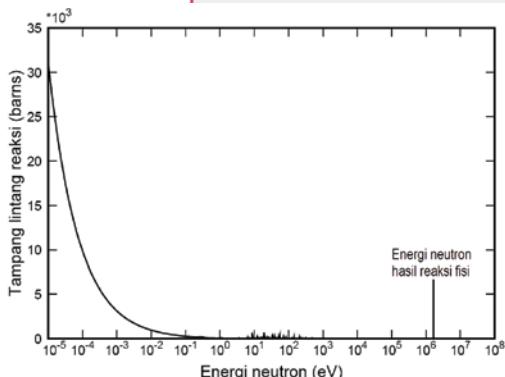
Pada gambar di atas, terlihat bahwa dua partikel inti produk fisi dari ^{235}U akan mempunyai probabilitas yang tinggi untuk partikel inti dengan nomor massa sekitar 95 dan 140.

Reaksi fisi ^{235}U sangat terkenal karena reaksi nuklir ini mendasari beroperasinya reaktor nuklir yang banyak beroperasi di dunia. Selain reaksi fisi ^{235}U , masih banyak unsur lain yang dapat berfisi. Pada dasarnya semua isotop unsur dalam golongan aktinida yang mempunyai jumlah neutron ganjil pada intinya dapat berfisi. Isotop aktinida yang dapat berfisi tersebut antara lain adalah plutonium-241 (${}_{94}^{241}\text{Pu}$), kurium-243 (${}_{96}^{243}\text{Cm}$), uranium-232 (${}_{92}^{232}\text{U}$), kalifornium-241 (${}_{98}^{241}\text{Cf}$), amerisium-242 (${}_{95}^{242}\text{Am}$), kalifornium-251 (${}_{98}^{251}\text{Cf}$), kurium-245 (${}_{96}^{245}\text{Cm}$), plutonium-239 (${}_{94}^{239}\text{Pu}$), uranium-233 (${}_{92}^{233}\text{U}$), kurium-247 (${}_{96}^{247}\text{Cm}$), uranium-235 (${}_{92}^{235}\text{U}$). Isotop yang dapat berfisi disebut

gambar 17.
Tampang
lintang reaksi
fisi versus energi
neutron untuk
uranium-235

sebagai bahan fisil (*fissile material*).

Dari sekian banyak bahan fisil, empat bahan fisil U-233, U-235, Pu-239, Pu-241 mempunyai arti penting karena sudah diterapkan dalam proses reaksi nuklir di reaktor nuklir. U-235, Pu-239 dan Pu-241 digunakan dalam bahan bakar reaktor termal dan reaktor pembiak yang memanfaatkan daur bahan bakar uranium, sedangkan U-233 digunakan dalam reaktor yang memanfaatkan daur bahan bakar thorium.



dapat menimbulkan reaksi fisi sebagai fungsi energi neutron.

Pada gambar tersebut terlihat bahwa neutron dengan energi rendahlah yang justru mempunyai kemungkinan tinggi untuk menimbulkan reaksi fisi pada inti atom U-235. Dari reaksi fisi U-235 dihasilkan 2 hingga 3 buah neutron dengan energi ~ 2 MeV. Sesuai dengan kurva pada gambar di atas, energi neutron hasil fisi setinggi ~ 2 MeV sangat kecil untuk menimbulkan reaksi fisi jika menumbuk inti atom U-235 yang lain.

Reaksi Fisi Berantai

Fenomena reaksi fisi berantai adalah sangat penting dalam mewujudkan

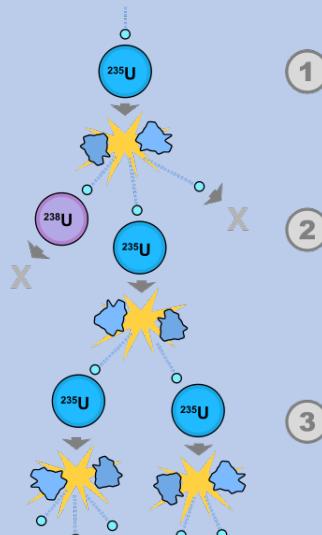
Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

pemanfaatan energi hasil reaksi fisi dalam sebuah reaktor nuklir. Terputusnya kontinuitas reaksi fisi dalam reaktor nuklir akan menyebabkan berhentinya produksi energi, sehingga produksi energi menjadi diskontinu, suatu kondisi yang tidak diinginkan. Fenomena reaksi fisi berantai dapat dilukiskan dalam sebuah gambar disamping ini.

Gambar tersebut menjelaskan suatu fenomena reaksi fisi berantai. Pada awalnya sebuah neutron menumbuk inti uranium-235 (U-235) dan menimbulkan reaksi yang menghasilkan produk fisi (Ba-141 dan Kr-92) serta 3 buah neutron. Dua dari tiga neutron hasil reaksi fisi itu kemudian menumbuk inti U235 lainnya dan menimbulkan reaksi fisi berikutnya (reaksi fisi generasi kedua). Neutron hasil fisi dari reaksi fisi kedua ini diharapkan akan menimbulkan reaksi fisi berikutnya (reaksi fisi generasi ketiga), dan selanjutnya akan terjadi reaksi fisi dari generasi ke generasi secara kontinu.

Persoalan dalam mewujudkan reaksi fisi berantai timbul karena untuk mewujudkan reaksi fisi U-235 diperlukan neutron lambat, sedangkan neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi U-235 adalah neutron cepat yang sangat sulit untuk memicu reaksi fisi generasi ke generasi. Dalam reaktor nuklir, persoalan ketersediaan neutron lambat dengan energi kinetik rendah diwujudkan dengan menyediakan medium yang bertugas memperlambat (memoderasi) kecepatan neutron, yaitu berupa air. Dengan adanya air sebagai moderator neutron, maka neutron cepat yang dihasilkan dari reaksi fisi U-235 diperlambat kecepatannya sehingga dapat digunakan untuk melangsungkan reaksi fisi berantai dari generasi ke generasi.

Bila suatu saat air sebagai bahan moderator menghilang dari dalam reaktor nuklir (oleh karena suatu sebab, misalnya kecelakaan) maka dengan



gambar 18.
Fenomena
reaksi fisi U-235
berantai

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

sendirinya reaksi fisi berantai terhenti dan produksi energi juga berhenti dengan sendirinya.

Satu buah neutron lambat (disebut juga neutron termal) dalam reaktor nuklir akan menimbulkan reaksi fisi U-235 yang menghasilkan energi panas ~ 200 MeV ($\sim 8,9 \times 10^{-18}$ kWh). Ini berarti bahwa sebuah neutron lambat setara dengan $\sim 8,9 \times 10^{-18}$ kWh. Apabila dari generasi ke generasi jumlah neutron termal dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan energi, maka realisasi pengendalian reaksi fisi dapat terwujud. Fenomena pengendalian reaksi fisi berantai ini terjadi dalam sebuah reaktor nuklir. Keberlangsungan reaksi fisi berantai dalam reaktor nuklir sangat labil, sedikit saja kecelakaan yang menguapkan moderator (berupa air), maka reaksi fisi berantai terhenti, demikian pula dengan pembangkitan energi.

Reaksi fisi berantai dapat pula dilangsungkan dalam waktu sangat cepat dengan pelipatan jumlah reaksi yang sangat tinggi, dengan cara ini pembangkitan energi meningkat sangat besar dalam waktu yang sangat singkat. Hasilnya adalah sebuah ledakan nuklir yang dahsyat. Mewujudkan suatu ledakan nuklir dengan U235 tidaklah mudah, harus dilakukan upaya ketersediaan dan peningkatan jumlah neutron dengan energi kinetik yang cocok dalam jumlah besar dalam waktu sesingkat-singkatnya.

Reaksi Fusi

Reaksi fusi atau sering disebut reaksi termonuklir adalah reaksi nuklir yang terjadi karena proses penggabungan dua inti atau dua partikel inti ringan menjadi inti atau partikel inti yang lebih berat sambil melepaskan (atau dapat juga menyerap) sejumlah energi.

Reaksi fusi dari partikel-partikel inti yang lebih ringan dari partikel inti atom besi akan menghasilkan energi (reaksi eksotermis), sedangkan reaksi nuklir dari partikel-partikel inti yang lebih berat dari partikel inti besi akan menyerap energi (reaksi endotermis). Energi yang dibebaskan dari reaksi fusi sangat besar, bahkan Bumi tempat habitat manusia dipasok energinya dari reaksi fusi yang terjadi di matahari. Berikut ini diberikan contoh-contoh reaksi fusi.

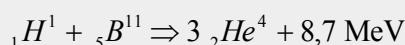
Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Reaksi fusi partikel inti deuterium (${}_1H^2$) dan tritium (${}_1H^3$) yang menghasilkan helium (${}_2He^4$) dan partikel neutron (${}_0n^1$) :



Dalam reaksi fusi ini, masing-masing partikel hasil reaksi fusi bergerak dan memiliki energi kinetik, inti helium memiliki energi kinetik 3,5 MeV dan partikel neutron 14,1 MeV.

Berikut ini adalah contoh-contoh reaksi fusi lainnya yang mempunyai prospek sebagai bahan bakar dalam reaktor fusi yang sedang diteliti sejak tahun 1950-an hingga sekarang.



gambar 19.
Reaksi fusi D + T
menghasilkan He
dan neutron

Transmutasi Nuklir

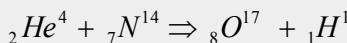
Transmutasi inti atau transmutasi nuklir adalah perubahan suatu unsur kimia atau isotop menjadi unsur kimia atau isotop lain melalui reaksi nuklir.

Di alam berlangsung transmutasi nuklir natural yang terjadi pada unsur radioaktif yang secara spontan meluruh selama kurun waktu bertahun-tahun dan akhirnya berubah menjadi unsur yang lebih stabil. Transmutasi nuklir buatan dapat dilakukan dengan menggunakan reaktor fisi, reaktor fusi atau alat pemercepat partikel (*particle accelerator*). Transmutasi nuklir buatan dilakukan dengan tujuan mengubah unsur kimia atau radioisotop dengan tujuan tertentu. Limbah radioaktif yang dihasilkan dari reaktor nuklir yang mempunyai umur sangat panjang dapat saja ditransmutasikan menjadi radioisotop yang lebih stabil dan memancarkan radioaktivitas dengan umur yang lebih pendek. Reaksi fisi dan reaksi fusi sebenarnya juga dapat

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

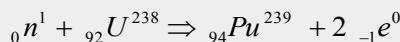
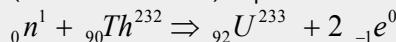
digolongkan sebagai transmutasi inti, karena dalam kedua reaksi nuklir tersebut terjadi perubahan inti atom yang dapat menyebabkan perubahan unsur kimia atau isotop.

Salah satu contoh transmutasi nuklir buatan yang menunjukkan bahwa suatu unsur kimia dapat diubah menjadi unsur kimia baru lainnya dibuktikan oleh Lord Rutherford pada tahun 1919, yaitu dengan cara membombardir unsur nitrogen dengan sinar alpha yang menghasilkan unsur oksigen dan partikel proton. Reaksi dari transmutasi ini dapat dituliskan sebagai :

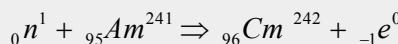


Berbagai transmutasi nuklir terjadi dalam sebuah reaktor nuklir, dari transmutasi nuklir tersebut ada beberapa transmutasi yang disengaja dan diperhitungkan kejadiannya untuk tujuan tertentu misalnya untuk mengubah bahan yang tidak dapat membelah menjadi bahan fisil, atau mengubah radioisotop berumur sangat panjang menjadi radioisotop yang lebih pendek umurnya atau bahkan menjadi unsur stabil yang tidak memancarkan radioaktif. Bahan yang dapat diubah menjadi bahan fisil disebut sebagai bahan fertil. Reaksi nuklir transmutasi tersebut diantaranya adalah sebagai berikut.

Transmutasi bahan fertil thorium-232(Th-232) dan uranium-238(U-238) menjadi bahan fisil (U-233 dan Pu-239) dapat dituliskan sebagai berikut :



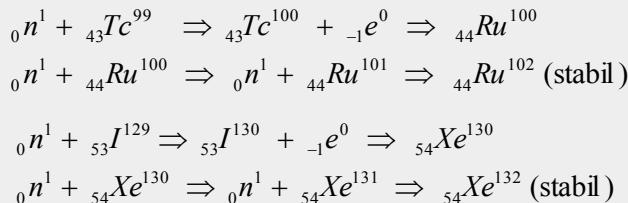
Transmutasi limbah radioaktif berumur panjang dari kelompok aktinida minor yaitu amerisium-241 (${}_{95}Am^{241}$) menjadi bahan fisil kurium-243 (${}_{96}Cm^{243}$) agar dapat berfisi di dalam reaktor nuklir dari pada meluruh dengan memancarkan radioaktif yang berbahaya sebagai limbah nuklir :



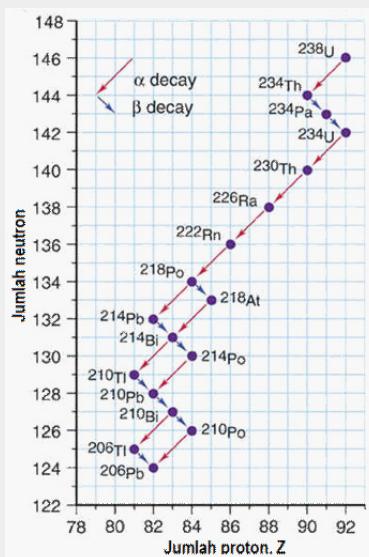
Contoh transmutasi nuklir lain yang digunakan untuk mengubah bahan-bahan produk reaksi fisi nuklir (atau produk fisi) radioaktif berumur sangat panjang menjadi unsur stabil yang tidak memancarkan radioaktif adalah

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

transmutasi teknesium-99 ($_{43}^{99}\text{Tc}$) dengan umur paruh $2,13 \times 10^5$ tahun dan iodium-129 ($_{53}^{129}\text{I}$) dengan umur paruh $1,6 \times 10^7$ tahun.



Transmutasi nuklir natural terjadi pada unsur berat, yang melakukan transmutasi dengan memancarkan radioaktif untuk menuju ke unsur ringan yang lebih stabil. Contoh dari transmutasi nuklir natural adalah peluruhan



gambar 20.
Contoh
transmutasi
natural dari
U-238 menjadi
Pb

uranium-238 (U-238) menuju unsur timbal (Pb), seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

1.4 Radioaktivitas

Sebagaimana telah dibahas pada bagian sebelumnya bahwa setiap inti atom yang tidak stabil (radioisotop atau inti radioaktif) akan meluruh atau berubah menjadi inti atom lain yang lebih stabil dengan memancarkan radiasi. Laju peluruhan tersebut ternyata tidak sama antara satu inti atom dengan inti atom yang lain.

Radioaktivitas atau aktivitas peluruhan radiasi didefinisikan sebagai jumlah peluruhan per detik. Aktivitas radiasi (A) suatu sumber atau zat radioaktif ditentukan oleh jumlah inti radioaktif yang dikandungnya (N) dan konstanta peluruhan dari inti radioaktif tersebut (λ).

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (1)$$

Konstanta peluruhan (λ) bersifat unik yang berarti bahwa nilai λ dari suatu inti radioaktif akan berbeda dengan inti radioaktif yang lain. Satuan λ adalah per detik (detik -1) sedangkan satuan aktivitas adalah Becquerel (Bq) atau Currie (Ci) dengan nilai sebagai berikut.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ peluruhan per detik}$$
$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ peluruhan per detik}$$

Persamaan Peluruhan

Persamaan (1) di atas secara matematik dapat diturunkan lebih lanjut sehingga memperoleh korelasi sebagai berikut.

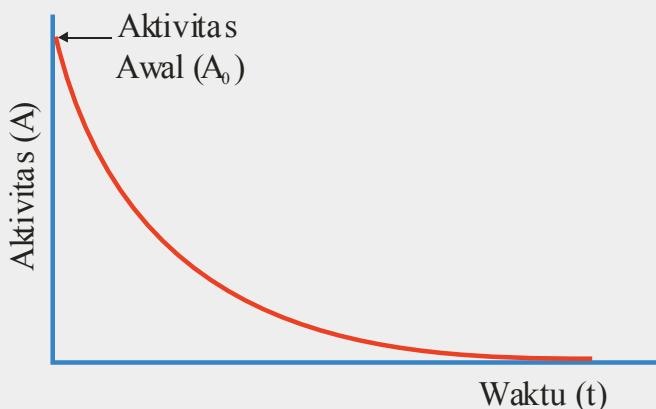
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Jumlah inti radioaktif yang dikandung oleh suatu zat radioaktif akan berkurang secara terus menerus mengikuti kurva eksponensial negatif, demikian pula radioaktivitasnya sebagaimana ditunjukkan pada persamaan

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

(2) dan (3) di atas. Gambar berikut menunjukkan peluruhan aktivitas suatu sumber atau zat radioaktif.



gambar 21.
Peluruhan
aktivitas suatu
zat radioaktif

Terlihat pada gambar di atas bahwa aktivitas zat radioaktif tidak tetap melainkan berkurang terus dengan berjalananya waktu. Kecepatan suatu zat radioaktif meluruh sampai "habis" sangat ditentukan oleh konstanta peluruhan (λ) nya.

Waktu Paro

Untuk mempermudah penggambaran terhadap kecepatan peluruhan zat radioaktif maka sering digunakan parameter baru yaitu waktu paro ($T_{1/2}$) yang didefinisikan sebagai selang waktu yang dibutuhkan oleh suatu inti radioaktif untuk meluruh menjadi setengah dari aktivitasnya semula. Nilai $T_{1/2}$ itu sendiri berbanding terbalik dengan konstanta peluruhan sehingga mempunyai satuan detik

$$T^{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Waktu paro suatu inti radioaktif sangat bervariasi mulai orde menit sampai tahun bahkan ratusan tahun. Sebagai contoh, Ba-137* mempunyai waktu

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

paro 2,5 menit, Iridium 192 (Ir-192) selama 74 hari, Kobalt-60 (Co-60) selama 5,27 tahun, sedangkan Amerisium-241 (Am-241) selama 430 tahun.

Secara operasional, parameter waktu paro ini lebih sering dan lebih mudah untuk digunakan daripada konstanta peluruhan. Sebagai contoh bila suatu zat radioaktif Ir-192 pada hari ini mempunyai aktivitas 100 Ci maka aktivitasnya setelah 10 bulan tinggal 6,75 Ci karena telah melewati 4 kali $T_{1/2}$ nya.

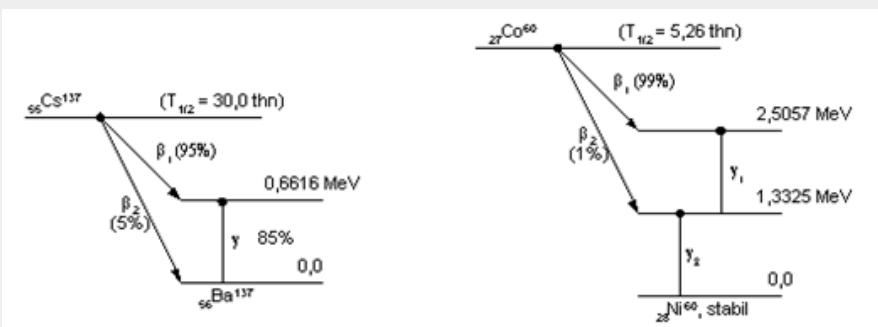
Intensitas Radiasi

Intensitas radiasi mempunyai definisi pancaran energi per satuan waktu dan per satuan luas. Pengertian intensitas radiasi mencakup dua parameter yaitu energi radiasi dan kuantitas atau jumlah radiasi yang dipancarkan per satuan waktu. Selain itu, ada pengertian lain yang sering digunakan khususnya di bidang proteksi radiasi yaitu dosis radiasi.

Skema Peluruhan (decay chart)

Proses peluruhan suatu inti radioaktif dari keadaan tidak stabil menjadi stabil ternyata menempuh tahapan tertentu yang bersifat unik. Tahapan peluruhan tersebut digambarkan menjadi suatu skema peluruhan inti radioaktif tertentu. Gambar berikut ini menunjukkan dua contoh yaitu skema peluruhan Sesium-137(Cs-137) dan Kobalt-60 (Co-60).

gambar 22.
Skema peluruhan
Cs-137 (kiri) dan
Co-60 (kanan)



Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Berdasarkan skema peluruhan tersebut dapat diketahui banyak hal diantaranya jenis radiasi yang dipancarkan, energi radiasi dari setiap jenis radiasi, dan probabilitas pancaran setiap radiasinya.

Kuantitas Radiasi

Kuantitas radiasi adalah jumlah radiasi per satuan waktu per satuan luas, pada suatu titik pengukuran. Kuantitas radiasi ini sebanding dengan aktivitas sumber radiasi dan probabilitas pancarannya. Sebagai contoh, 100 Bq. Radioisotop Cs-137 akan memancarkan 85 radiasi γ per detik sedangkan 100 Bq. Radioisotop Co-60 akan memancarkan 199 radiasi γ per detik ke segala arah.

Jumlah radiasi yang mencapai suatu titik pengukuran berjarak tertentu dari sumber radiasi tentu saja tidak sebesar jumlah radiasi yang dipancarkan oleh sumber karena dipengaruhi lagi oleh jarak dan medium di antaranya. Hubungan antara intensitas radiasi terhadap jarak mengikuti persamaan "*inverse square law*" (hukum kuadrat terbalik) sebagai berikut.

$$I_1 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \times I_2 \quad (4)$$

Energi Radiasi

Energi radiasi merupakan "kekuatan" dari setiap radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber radiasi. Tingkat energi yang dipancarkan oleh suatu radioisotop bersifat unik, artinya setiap radioisotop akan memancarkan radiasi dengan energi tertentu yang berbeda dengan radioisotop yang lain. Nilai energi radiasi ini tidak dipengaruhi oleh radioaktivitas sumber.

Sebagai contoh (lihat skema peluruhan) bila hanya memperhatikan pancaran radiasi γ nya saja, maka radioisotop Cs-137 akan memancarkan radiasi γ dengan energi 661,6 keV sedangkan radioisotop Co-60 akan memancarkan dua jenis radiasi γ yaitu yang berenergi 1.173 keV dan 1.332 keV.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Dosis Radiasi

Dosis radiasi menggambarkan tingkat perubahan atau kerusakan yang dapat ditimbulkan oleh radiasi bila mengenai materi. Nilai dosis ini sangat ditentukan oleh kuantitas radiasi, jenis radiasi dan energi radiasi yang mengenainya. Dalam proteksi radiasi pengertian dosis adalah jumlah energi radiasi yang terdapat dalam medan radiasi atau jumlah energi radiasi yang diserap atau diterima oleh materi.

Dosimetri merupakan kegiatan pengukuran dosis radiasi dengan teknik pegukurannya didasarkan pada pengukuran hasil pengionan yang disebabkan oleh radiasi dalam gas, terutama udara. Dalam proteksi radiasi, metode pengukuran dosis radiasi ini dikenal dengan sebutan dosimetri radiasi. Selama perkembangannya, besaran yang dipakai dalam pengukuran jumlah radiasi selalu didasarkan pada jumlah ion yang terbentuk dalam keadaan tertentu atau pada jumlah energi radiasi yang diserahkan kepada bahan.

Sama halnya dengan besaran-besaran fisika lainnya, radiasi juga mempunyai ukuran atau satuan untuk menunjukkan besarnya pancaran radiasi dari suatu sumber, atau menunjukkan banyaknya dosis radiasi yang diberikan atau diterima oleh suatu medium yang terkena radiasi. Radasi mempunyai satuan karena radiasi itu membawa atau mentransfer energi dari sumber radiasi yang diteruskan kepada medium yang menerima radiasi. Sampai saat ini ICRP masih tetap menggunakan besaran makroskopis yang disebut besaran dosimetri yang secara formal telah didefinisikan oleh ICRU. Ada beberapa besaran dan satuan dasar yang berhubungan dengan radiasi pengion ini disesuaikan dengan kriteria penggunaannya. Berikut ini akan dibahas besaran-besaran dan satuan-satuan dasar dalam dosimetri.

a. Dosis Serap

Radiasi dapat mengakibatkan pengionan pada jaringan atau medium yang dilaluinya. Untuk mengukur besarnya energi radiasi yang diserap oleh medium perlu diperkenalkan suatu besaran yang tidak bergantung pada jenis radiasi, energi radiasi maupun sifat bahan penyerap, tetapi hanya bergantung pada jumlah energi radiasi yang diserap persatuan massa bahan yang menerima penyinaran radiasi tersebut. Untuk mengetahui jumlah energi yang diserap oleh medium ini digunakan besaran dosis serap.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Dosis serap didifinisikan sebagai jumlah energi yang diserahkan oleh radiasi atau banyaknya energi yang diserap oleh bahan persatuan massa bahan itu.

Jadi dosis serap merupakan ukuran banyaknya energi yang diberikan oleh radiasi pengion kepada medium. Dalam sistem SI, besaran dosis serap diberi satuan khusus, yaitu Gray dan disingkat dengan Gy. Sebelum satuan SI digunakan, dosis serap diberi satuan erg/g, dan diberi nama satuan khusus rad (*radiation absorbed dose*), dimana 1 rad setara dengan 100 erg/g.

b. Dosis Ekivalen

Sebelumnya orang menduga bahwa radiasi dapat menyebabkan perubahan dalam suatu sistem hanya berdasarkan pada besar energi radiasi yang terserap oleh jaringan. Namun kenyataannya tidaklah demikian. Ditinjau dari sudut biologi yang ditimbulkan, ternyata efek yang timbul pada suatu jaringan akibat penyinaran oleh bermacam-macam radiasi pengion tidak sama, meskipun dosis serap dari beberapa jenis radiasi yang diterima oleh jaringan itu sama besar. Jadi dalam hal ini, penyerapan sejumlah energi radiasi yang sama dari beberapa jenis radiasi yang berbeda tidak menimbulkan efek biologi yang sama. Efek biologi yang timbul ternyata juga bergantung pada jenis dan kualitas radiasi.

Dalam proteksi radiasi, besaran dosimetri yang lebih berguna karena berhubungan langsung dengan efek biologi adalah dosis ekivalen. Besaran dosis ekivalen lebih banyak digunakan berkaitan dengan pengaruh radiasi terhadap tubuh manusia atau sistem biologi lainnya. Dalam konsep dosis ekivalen ini, radiasi apapun jenisnya asal nilai dosis ekivalennya sama akan menimbulkan efek biologi yang sama pula terhadap jaringan tertentu. Dalam hal ini ada suatu faktor yang ikut menentukan dalam perhitungan dosis ekivalen, yaitu kualitas radiasi yang mengenai jaringan. Kualitas radiasi ini mencakup jenis dan energi dari radiasi yang bersangkutan.

Untuk menunjukkan kualitas dari radiasi dalam kaitannya dengan akibat biologi yang dapat ditimbulkannya, ICRP melalui Publikasi Nomor 60 Tahun 1990, memperkenalkan faktor bobot radiasi, w_R . Dosis ekivalen pada prinsipnya adalah dosis serap yang telah dibobot, yaitu dikalikan dengan faktor bobotnya. Faktor bobot radiasi ini dikaitkan dengan kemampuan radiasi dalam membentuk pasangan ion persatuan panjang lintasan. Semakin banyak pasangan ion yang dapat dibentuk persatuan panjang

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

lintasan, semakin besar pula nilai bobot radiasi itu. ICRP melalui Publikasi ICRP Nomor 60 Tahun 1990 menetapkan nilai w_R yang berbeda-beda berdasarkan pada jenis dan energi radiasi.

Mengingat faktor bobot tidak berdimensi, maka satuan dari dosis ekivalen dalam sistem SI sama dengan satuan untuk dosis serap. Namun untuk membedakan antara kedua besaran tersebut, dosis ekivalen diberi satuan khusus, yaitu Sievert dan disingkat dengan Sv. Sebelum digunakan satuan SI, dosis ekivalen diberi satuan Rem (*Roentgen equivalent man atau mammal*) yang besarnya 1 Sv = 100 Rem. Jika dalam konsep dosis serap dua dosis yang sama besar (dalam Gy) dari radiasi yang kualitasnya berlainan akan menimbulkan efek biologi yang berlainan, maka dalam konsep dosis ekivalen ini dua dosis radiasi yang sama besar (dalam Sv) dari radiasi pengion jenis apapun akan menimbulkan efek biologi yang sama.



gambar 23. Berbagai jenis instrumentasi radiasi untuk mengukur dosis radiasi (sumber : JAERI)

besaran dosis ekivalen yang dibobot. Faktor pembobot dosis ekivalen untuk organ T disebut faktor bobot jaringan, w_T . Jumlah faktor bobot jaringan untuk seluruh tubuh sama dengan satu. ICRP melalui Publikasi ICRP Nomor 60 Tahun 1990 menetapkan nilai w_T yang nilainya berbeda-beda untuk berbagai jenis jaringan di dalam tubuh. Nilai faktor bobot dikembangkan dengan menggunakan manusia acuan dengan jumlah yang sama untuk setiap jenis kelamin dan mencakup rentang umur yang cukup lebar.

d. Paparan

Paparan pada mulanya merupakan besaran untuk menyatakan intensitas sinar-X yang dapat menghasilkan pengionan di udara dalam jumlah tertentu.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Besaran paparan ini mempunyai satuan Coulomb per kilogram-udara ($C \cdot kg^{-1}$) dan diberi nama khusus Roentgen, disingkat R. Satuan Roentgen semula hanya berlaku untuk sinar-X. Namun pada tahun 1937 satuan ini didifinisikan ulang sehingga berlaku juga untuk sinar gamma.

1.5

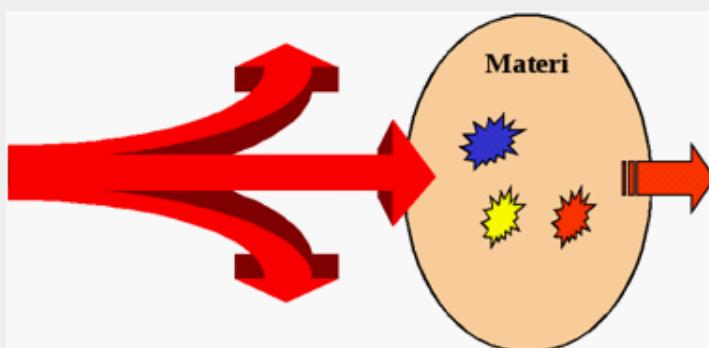
Interaksi Radiasi dengan Materi

Terdapat tiga kemungkinan ketika radiasi nuklir mengenai materi yaitu dibelokkan, diserap (berinteraksi), atau diteruskan.

Secara umum interaksi radiasi dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu interaksi radiasi partikel bermuatan, yaitu radiasi α dan β ; radiasi partikel tidak bermuatan yaitu radiasi neutron; dan radiasi gelombang elektromagnetik (foton) yaitu radiasi γ dan sinar-X. Karena karakteristik tiga jenis radiasi tersebut berbeda maka proses interaksinya pun berbeda-beda.

Interaksi Radiasi Partikel Bermuatan

Terdapat tiga kemungkinan interaksi radiasi partikel bermuatan ketika mengenai materi yaitu proses ionisasi, proses eksitasi, dan proses



gambar 24.
Radiasi nuklir
ketika mengenai
materi

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

bremstrahlung. Radiasi yang karena mempunyai massa dan muatan yang relatif lebih besar, cenderung melakukan proses ionisasi sedangkan partikel lain yang lebih kecil misalnya beta, elektron, atau proton dapat melakukan tiga interaksi tersebut di atas. Sebenarnya ada interaksi lain yaitu reaksi inti, akan tetapi probabilitasnya jauh lebih kecil dibandingkan tiga interaksi sebelumnya. Sebagai contoh adalah proses aktivasi inti, yaitu membuat inti atom baru menggunakan pemercepat proton (*akselerator*).

Proses Ionisasi

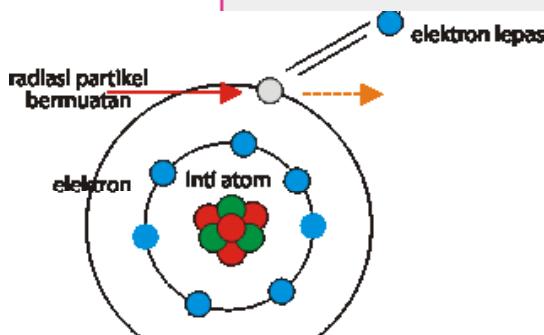
Ketika radiasi partikel bermuatan melalui materi maka terdapat beberapa elektron yang akan terlepas dari lintasannya karena adanya gaya tarik Coulomb. Proses terlepasnya elektron dari suatu atom dinamakan sebagai proses ionisasi (gambar 25). Setelah terjadi proses ionisasi maka atom tersebut akan bermuatan positif (ion positif).

Energi radiasi yang datang akan berkurang setelah melakukan proses ionisasi. Proses ionisasi dapat berlangsung berulang kali, bahkan sampai ribuan kali, sampai energi radiasinya habis.

Elektron yang terlepas dari ikatannya tersebut (ion negatif) akan menjadi elektron bebas yang tidak mempunyai energi kinetik dan bebas bergerak secara random di medium.

gambar 25.
Proses ionisasi

Proses Eksitasi



Proses ini mirip dengan proses ionisasi, perbedaannya, dalam proses eksitasi ini elektron tidak sampai lepas dari atomnya hanya berpindah ke lintasan luar (gambar 26). Setelah terjadi proses atom tersebut akan berubah menjadi atom eksitasi.

Sebaliknya pada proses ionisasi, energi radiasi yang datang akan berkurang setelah melakukan proses eksitasi.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Proses eksitasi dapat berlangsung berulang kali, bahkan sampai ribuan kali, sampai energi radiasinya habis.

Atom yang berada dalam keadaan tereksitasi ini akan segera kembali ke keadaan dasarnya (*ground state*) dengan melakukan transisi elektron. Salah satu elektron yang berada di lintasan luar akan berpindah mengisi kekosongan di lintasan yang lebih dalam sambil memancarkan sinar-X karakteristik. Energi sinar-X karakteristik yang dipancarkan dalam peristiwa ini setara dengan selisih energi antara lintasan sebelum dan sesudah transisi.

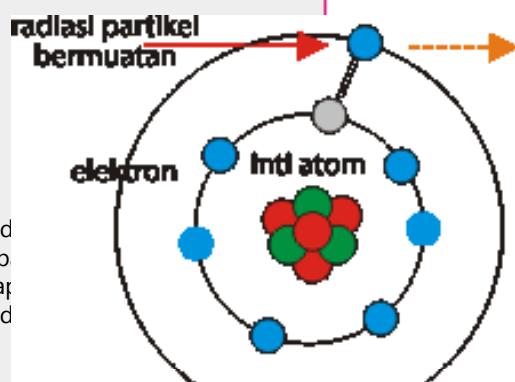
Proses Brehmstrahlung

Proses ini lebih dominan terjadi pada interaksi rad beta dan elektron karena massa dan muatan β relatif lebih kecil sehingga kurang diserap materi dan daya tembusnya lebih tinggi dibanding dengan partikel α .

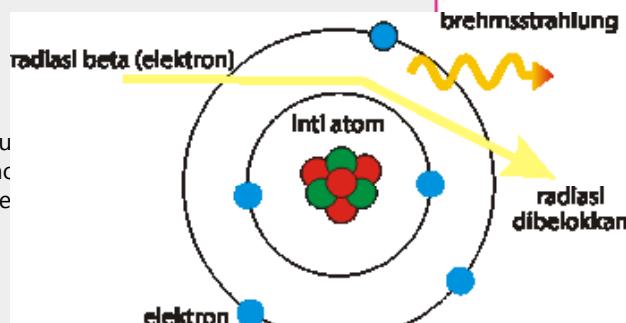
Dengan adanya gaya elektrostatik, radiasi β atau elektron yang bergerak mendekati inti akan dibelokkan. Perubahan arah gerak ini akan menyebabkan perubahan momentum yang menyebabkan penerapan energi gelombang elektromagnetik (foton). Foton tersebut dinamai sinar-X brehmstrahlung (bedakan dengan sinar-X karakteristik yang dihasilkan oleh transisi elektron).

Berbeda dengan energi sinar-X karakteristik yang hanya dipengaruhi oleh selisih tingkat energi lintasan, tingkat energi sinar-X brehmstrahlung ini dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu energi radiasi yang mengenainya, nc (jumlah proton) inti, dan sudut pembelokan.

Interaksi Radiasi Neutron



gambar 26.
Proses eksitasi



gambar 27.
Proses
Brehmstrahlung

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Berbeda dengan radiasi α , β dan γ , radiasi neutron memang tidak dihasilkan dari proses peluruhan spontan. Radiasi neutron dihasilkan dari proses reaksi fisi, misalnya di reaktor nuklir, atau dari neutron generator (akselerator ataupun zat radioaktif).

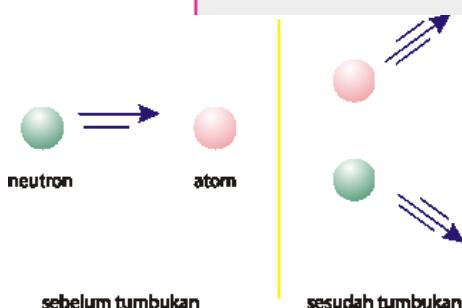
Neutron merupakan partikel yang mempunyai massa tetapi tidak bermuatan listrik sehingga interaksinya dengan materi lebih banyak bersifat mekanik, yaitu tumbukan antara neutron dengan atom (inti atom) bahan penyerap, baik secara elastik maupun tak elastik. Setiap tumbukan dengan materi akan menyerap energi neutron sehingga setelah beberapa kali tumbukan maka energi neutron akan "habis". Interaksi lain yang mungkin muncul bila energi neutron sudah sangat rendah-adalah reaksi inti atau penangkapan neutron oleh inti atom bahan penyerap.

Tumbukan Elastik

Tumbukan elastik adalah tumbukan di mana total energi kinetik partikel-partikel sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah. Dalam tumbukan elastik, sebagian energi neutron diberikan ke inti atom yang ditumbuknya sehingga atom tersebut terpental sedangkan neutronnya dibelokkan/dihamburkan.

Tumbukan elastik terjadi bila atom yang ditumbuk neutron mempunyai massa yang sama, atau hampir sama dengan massa neutron (misalnya atom Hidrogen), sehingga fraksi energi neutron yang terserap oleh atom tersebut cukup besar.

gambar 28.
Tumbukan elastik



Tumbukan Tak Elastik

Proses tumbukan tak elastik sebenarnya sama saja dengan tumbukan elastik, tetapi energi kinetik sebelum dan sesudah tumbukan berbeda. Ini terjadi bila massa atom yang ditumbuk neutron jauh lebih besar dari massa neutron. Setelah tumbukan, atom tersebut tidak terpental, hanya bergetar, sedang neutronnya terhamburkan. Dalam peristiwa ini, energi neutron yang diberikan

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

ke atom yang ditumbuknya tidak terlalu besar sehingga setelah tumbukan, energi neutron tidak banyak berkurang. Oleh karena itu, bahan yang mengandung atom-atom dengan nomor atom besar tidak efektif sebagai penahan radiasi neutron.

gambar 29.
Tumbukan tak
elastik

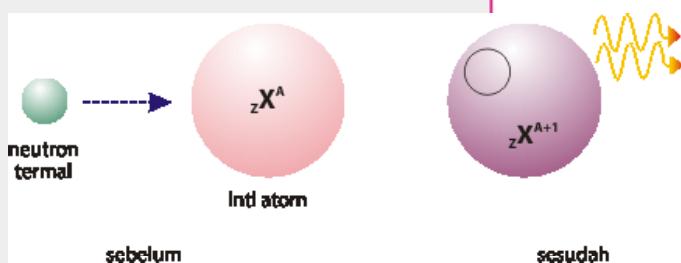
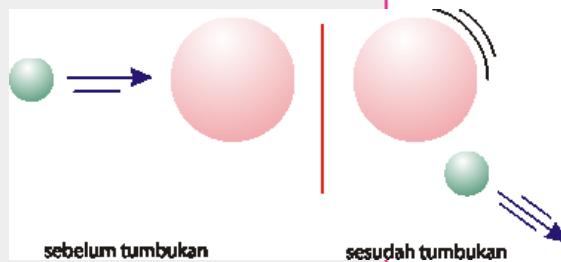
Reaksi Inti (Penangkapan Neutron)

Bila energi neutron sudah sangat rendah atau sering disebut sebagai neutron termal ($E_n < 0,025$ eV), maka terdapat kemungkinan bahwa neutron tersebut akan "ditangkap" oleh inti atom bahan penyerap sehingga membentuk inti atom baru, yang biasanya merupakan inti atom yang tidak stabil, yang memancarkan radiasi, misalnya α , β atau γ . Peristiwa ini yang disebut sebagai proses aktivasi neutron, yaitu mengubah bahan yang stabil menjadi bahan radioaktif. Sebagai contoh adalah proses aktivasi neutron berikut.



Isotop Alumunium-27 (Al-27) dari unsur aluminium merupakan inti atom yang stabil. Bila sebuah neutron termal mengenainya maka akan terjadi proses aktivasi yang mengubah isotop Al-27 menjadi radioisotop Al-28 yang merupakan inti radioaktif yang memancarkan radiasi gamma.

Proses reaksi inti seperti ini juga dapat disebabkan oleh partikel bermuatan misalnya proton tetapi dengan energi proton yang sangat tinggi. Mekanisme ini yang dapat dimanfaatkan untuk memproduksi radioisotop.



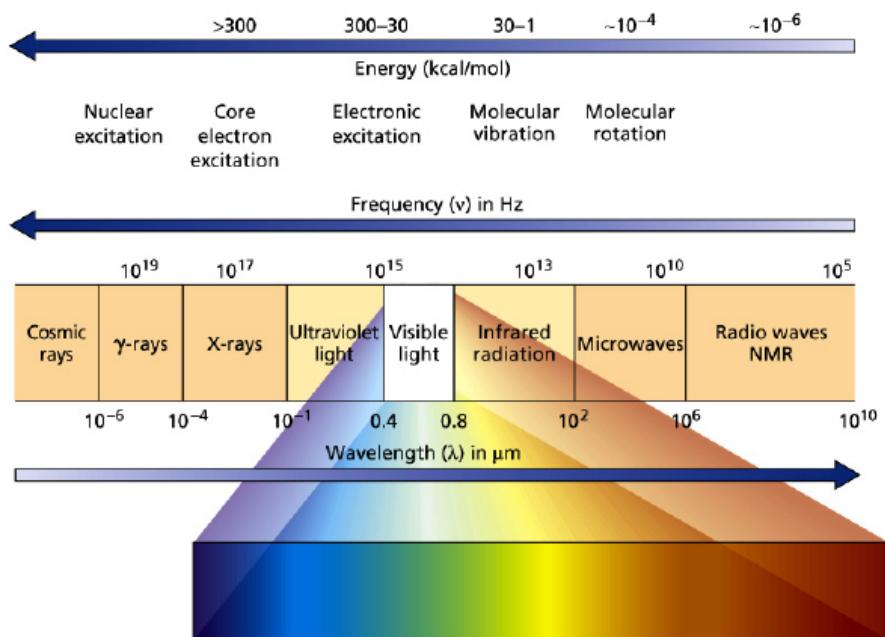
gambar 30.
Peristiwa
penangkapan
neutron

Interaksi Radiasi Gelombang Elektromagnetik

Keluarga gelombang elektromagnetik sebenarnya sangat banyak, yang dibedakan atas panjang gelombang atau tingkat energinya. Interaksi yang dibahas disini hanyalah interaksi sinar-X dan sinar gamma saja, yaitu radiasi foton yang dapat mengionisasi materi meskipun secara tidak langsung.

Terdapat tiga kemungkinan proses interaksi sinar γ dan sinar-X dengan materi yaitu efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan.

gambar 31.
Keluarga
gelombang
elektromagnetik



Efek Fotolistrik

Dalam proses efek fotolistrik, radiasi gelombang elektromagnetik yang datang mengenai atom seolah-olah "menumbuk" salah satu elektron dan memberikan seluruh energinya sehingga elektron tersebut lepas dari

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

lintasannya. Elektron yang dilepaskan dalam proses ini disebut fotoelektron, mempunyai energi sebesar energi radiasi yang mengenainya.

Efek fotolistrik sangat dominan terjadi bila foton mempunyai energi rendah, kurang dari 0,5 MeV dan lebih banyak terjadi pada material dengan nomor massa besar. Sebagai contoh efek fotolistrik lebih banyak terjadi pada timah hitam ($Z = 82$) daripada tembaga ($Z = 29$).

Hamburan Compton

Proses hamburan Compton sebenarnya menyerupai efek foto listrik, perbedaannya hanya sebagian saja energi radiasi yang diberikan ke elektron (fotoelektron), sedangkan sisanya masih berupa gelombang elektromagnetik yang dihamburkan.

Pada hamburan Compton, foton dengan energi $h\lambda_i$ berinteraksi dengan elektron terluar dari atom, selanjutnya foton dengan energi $h\lambda_o$ dihamburkan dan sebuah fotoelektron lepas dari ikatannya. Energi kinetik elektron (E_e) sebesar selisih energi foton masuk dan foton keluar.

$$E_e = h\lambda_i - h\lambda_o$$

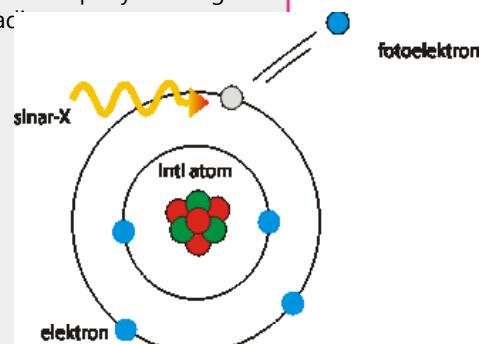
Hamburan Compton sangat dominan terjadi bila foton mempunyai energi sedang (di atas 0,5 MeV) dan lebih banyak terjadi pada material dengan nomor massa (Z) yang rendah.

Produksi Pasangan

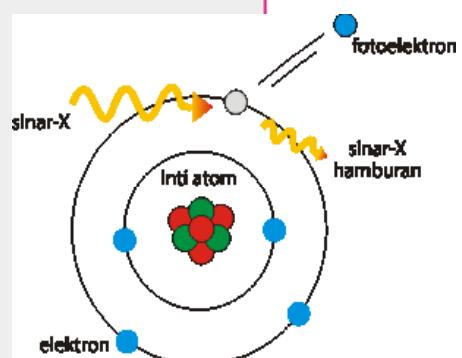
Proses produksi pasangan hanya terjadi bila energi foton lebih besar dari 1,02 MeV dan foton tersebut berhasil mendekati inti atom.

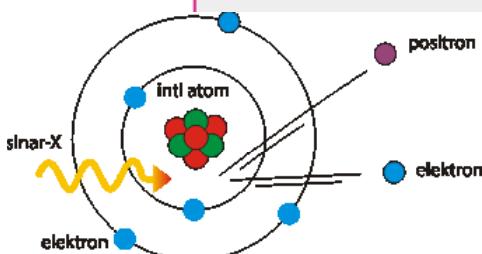
Radiasi foton ketika berada di daerah medan inti akan lenyap dan berubah

gambar 32.
Efek fotolistrik



Gambar 33.
Hamburan
Compton





gambar 34.
Produksi
pasangan

menjadi sepasang elektron – positron. Positron adalah partikel yang identik dengan elektron tetapi bermuatan positif.

Energi kinetik total dari dua partikel tersebut sama dengan energi foton yang datang dikurangi 1,02 MeV.

Ionisasi Tidak Langsung

Dari tiga interaksi gelombang elektromagnetik tersebut di atas terlihat bahwa semua interaksi menghasilkan partikel bermuatan (elektron atau positron) yang berenergi. Elektron atau positron yang berenergi tersebut dalam pergerakannya akan mengionisasi atom-atom bahan yang dilaluinya sehingga dengan kata lain, gelombang elektromagnetik juga dapat mengionisasi bahan tetapi secara tidak langsung.

1.6 Pengukuran Radiasi

Besaran Yang Diukur

Radiasi merupakan suatu cara perambatan energi dari sumber energi ke lingkungannya tanpa membutuhkan medium atau bahan pengantar tertentu. Radiasi nuklir memiliki sifat yang khas, diantaranya :

1. Tidak dapat dirasakan secara langsung dan
2. Dapat menembus berbagai jenis bahan.
oleh karena itu untuk mengetahui ada atau tidak adanya radiasi nuklir diperlukan suatu alat yaitu pengukur radiasi. Pengukur radiasi digunakan untuk mengukur kuantitas, energi, atau dosis radiasi.

Kuantitas Radiasi

Kuantitas radiasi adalah jumlah radiasi per satuan waktu per satuan luas, pada suatu titik pengukuran. Kuantitas radiasi ini berbanding lurus dengan

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

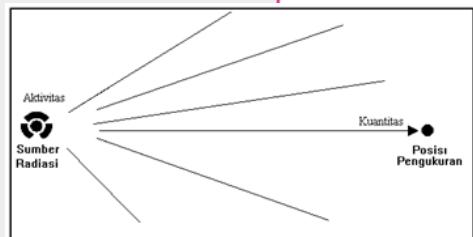
aktivitas sumber dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (r) antara sumber dan sistem pengukur.

Gambar 35 menunjukkan bahwa jumlah radiasi yang mencapai titik pengukuran (kuantitas radiasi) merupakan hanya sebagian saja dari semua radiasi yang dipancarkan oleh sumber.

gambar 35.
Kuantitas Radiasi

Energi Radiasi

Merupakan 'kekuatan' dari setiap radiasi yang dipancarkan oleh sumber radiasi. Bila sumber radiasi berupa radionuklida maka tingkat energi yang dipancarkan tergantung pada jenis radionuklidanya. Kalau sumber radiasinya berupa pesawat sinar-X, maka energi radiasinya bergantung pada tegangan anoda (kV) pesawat yang membangkitkannya. Tabel berikut menunjukkan contoh energi radiasi dari beberapa radionuklida.



Dosis Radiasi

Dosis radiasi sering diartikan sebagai jumlah energi radiasi yang diserap atau diterima oleh materi termasuk tubuh manusia. Nilai dosis sangat ditentukan oleh kuantitas radiasi, jenis dan energi radiasi serta jenis materi yang dikenainya.

Dalam bidang proteksi radiasi, nilai ini sangat penting karena berkaitan langsung dengan efek yang ditimbulkan radiasi pada tubuh manusia. Terdapat batasan nilai akumulasi dosis tahunan (NBD) yang diizinkan serta turunannya per jam yaitu 50 mSv per tahun atau 25 μ Sv per jam.

| Jenis radionuklida | Energi | Probabilitas |
|--------------------|-----------------------|--------------|
| Cd-109 | 88 keV | 3,70% |
| Cs-137 | 662 keV | 85% |
| Co-60 | 1173 keV dan 1332 keV | 99% dan 100% |

tabel 2 : Contoh energi radiasi dari beberapa radionuklida

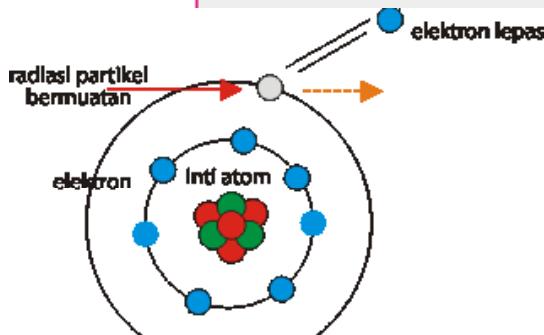
Mekanisme Pendektsian Radiasi

Detektor radiasi bekerja dengan cara mengukur perubahan yang disebabkan oleh penyerapan energi radiasi oleh medium penyerap. Sebenarnya terdapat banyak mekanisme yang terjadi di dalam detektor tetapi yang sering digunakan adalah proses ionisasi dan proses sintilasi.

Proses Ionisasi

gambar 36.
Proses ionisasi

Proses ionisasi adalah peristiwa terlepasnya elektron dari ikatannya karena menyerap energi eksternal (misalnya energi radiasi). Peristiwa ini dapat terjadi secara langsung oleh radiasi alpha atau beta dan secara tidak langsung oleh radiasi sinar-X, gamma dan neutron.



Dalam proses ionisasi, energi radiasi diubah menjadi pelepasan sejumlah elektron (energi listrik). Bila terdapat medan listrik maka elektron akan bergerak menuju ke kutub positif sehingga dapat menginduksikan arus atau tegangan listrik. Semakin besar energi radiasinya maka arus atau tegangan listrik yang dihasilkannya juga semakin besar pula.

Proses Sintilasi

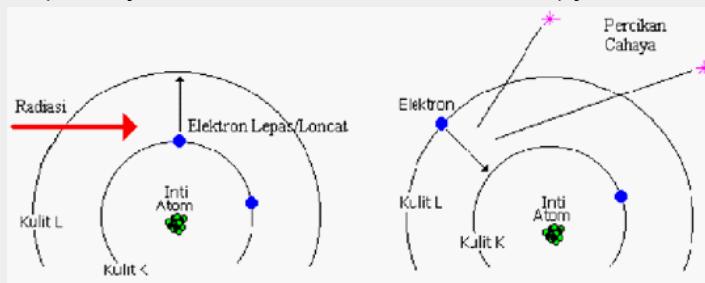
Proses sintilasi adalah terpancarnya percikan cahaya ketika terjadi transisi elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah di dalam detektor, bila terdapat kekosongan elektron pada orbit yang lebih dalam. Kekosongan tersebut dapat disebabkan oleh lepasnya elektron (proses ionisasi) atau loncatnya elektron ke lintasan yang lebih tinggi ketika dikenai radiasi (proses eksitasi).

Dalam proses sintilasi ini, energi radiasi diubah menjadi pencerahan cahaya tampak. Semakin besar energi radiasi yang diserap maka semakin banyak percikan cahayanya.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Jenis Detektor Radiasi

Detektor merupakan suatu bahan yang peka terhadap radiasi, yang bila dikenai radiasi akan menghasilkan respon mengikuti mekanisme yang telah dibahas sebelumnya. Perlu diperhatikan bahwa suatu bahan yang sensitif terhadap suatu jenis radiasi belum tentu sensitif terhadap jenis radiasi yang



gambar 37.
Proses Sintilasi

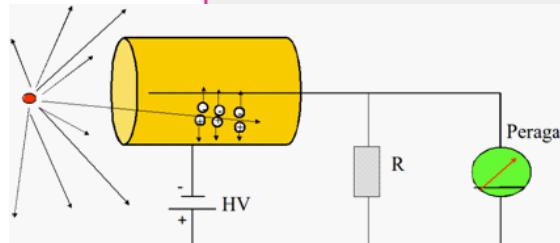
lain. Sebagai contoh, detektor radiasi gamma belum tentu dapat mendeteksi radiasi neutron.

Sebenarnya terdapat banyak jenis detektor, tetapi di sini hanya akan dibahas tiga jenis detektor yaitu, detektor isian gas, detektor sintilasi, dan detektor semikonduktor.

Detektor Isian Gas

Detektor isian gas merupakan detektor yang paling sering digunakan untuk mengukur radiasi. Detektor ini terdiri dari dua elektroda, positif dan negatif, serta berisi gas di antara kedua elektrodanya. Elektroda positif disebut sebagai anoda, yang dihubungkan ke kutub listrik positif, sedangkan elektroda negatif disebut sebagai katoda, yang dihubungkan ke kutub negatif. Kebanyakan detektor ini berbentuk silinder dengan kawat sumbu yang berfungsi sebagai anoda dan dinding silindrinya sebagai katoda seperti digambarkan oleh gambar 38.

Terdapat tiga jenis detektor isian gas yang bekerja pada daerah yang berbeda yaitu detektor kamar ionisasi, detektor proporsional, dan detektor Geiger Mueller (GM).



gambar 38.
Prinsip Kerja
Detektor Isian
Gas

Detektor Sintilasi

Detektor sintilasi selalu terdiri dari dua bagian yaitu bahan sintilator dan photomultiplier. Bahan sintilator merupakan suatu bahan padat, cair maupun gas, yang akan menghasilkan percikan cahaya bila dikenai radiasi pengion. Photomultiplier digunakan untuk mengubah percikan cahaya yang dihasilkan bahan sintilator

menjadi pulsa listrik. Mekanisme pendektsian radiasi pada detektor sintilasi dapat dibagi menjadi dua tahap yaitu:

1. Proses pengubahan radiasi yang mengenai detektor menjadi percikan cahaya di dalam bahan sintilator, dan
2. Proses pengubahan percikan cahaya menjadi pulsa listrik di dalam tabung photomultiplier.

a. Bahan Sintilator

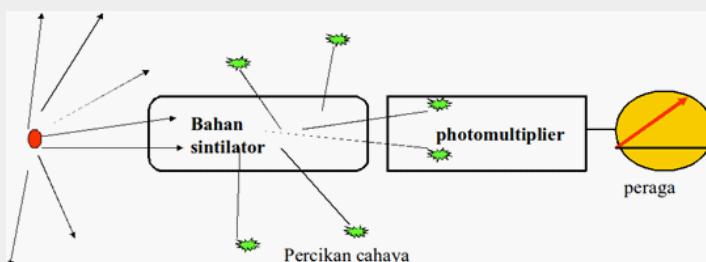
Proses sintilasi pada bahan ini dapat dijelaskan dengan Gambar 39. Di dalam kristal bahan sintilator terdapat pita-pita atau daerah yang dinamakan sebagai pita valensi dan pita konduksi yang dipisahkan dengan tingkat energi tertentu. Pada keadaan dasar, (*ground state*), seluruh elektron berada di pita valensi sedangkan di pita konduksi kosong.

Ketika terdapat radiasi yang memasuki kristal, terdapat kemungkinan bahwa energinya akan terserap oleh beberapa elektron di pita valensi, sehingga dapat meloncat ke pita konduksi. Beberapa saat kemudian elektron-elektron tersebut akan kembali ke pita valensi melalui pita energi bahan aktuator sambil memancarkan percikan cahaya.

Jumlah percikan cahaya sebanding dengan energi radiasi diserap dan dipengaruhi oleh jenis bahan sintilatornya. Semakin besar energinya semakin banyak percikan cahayanya. Percikan-percikan cahaya ini kemudian 'ditangkap' oleh photomultiplier.

Beberapa contoh bahan sintilator yang sering digunakan sebagai detektor radiasi adalah kristal NaI(Tl), kristal ZnS(Ag), kristal LiI(Eu), dan sintilator Organik.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas



gambar 39.
Prinsip Kerja
Detektor Sintilasi

b. Tabung Photomultiplier

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, setiap detektor sintilasi terdiri atas dua bagian yaitu bahan sintilator dan tabung photomultiplier. Bila bahan sintilator berfungsi untuk mengubah energi radiasi menjadi percikan cahaya maka tabung photomultiplier ini berfungsi untuk mengubah percikan cahaya tersebut menjadi berkas elektron, sehingga dapat diolah lebih lanjut sebagai pulsa / arus listrik.

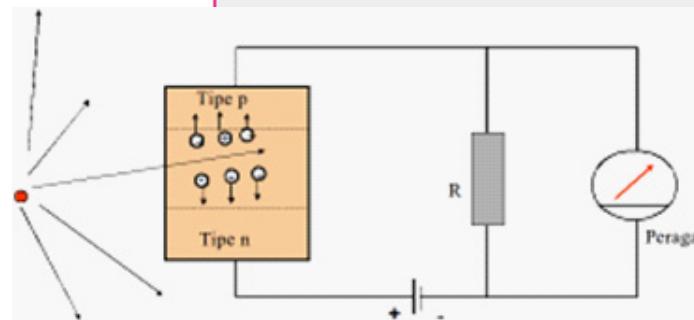
Detektor Semikonduktor

Bahan semikonduktor, yang diketemukan relatif lebih baru daripada dua jenis detektor di atas, terbuat dari unsur golongan IV pada tabel periodik yaitu silikon atau germanium. Detektor ini mempunyai beberapa keunggulan yaitu lebih effisien dibandingkan dengan detektor isian gas, karena terbuat dari zat padat, serta mempunyai resolusi yang lebih baik daripada detektor sintilasi.

Energi radiasi yang memasuki bahan semikonduktor akan diserap oleh bahan sehingga beberapa elektronnya dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Bila di antara kedua ujung bahan semikonduktor tersebut terdapat beda potensial maka akan terjadi aliran arus listrik. Jadi pada detektor ini, energi radiasi diubah menjadi energi listrik.

Detektor semikonduktor sangat teliti dalam membedakan energi radiasi yang mengenainya atau disebut mempunyai resolusi tinggi. Sebagai gambaran, detektor sintilasi untuk radiasi gamma biasanya mempunyai resolusi sebesar 50 keV, artinya, detektor ini dapat membedakan energi dari dua buah radiasi

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas



gambar 40.
Prinsip Kerja
Detektor
Semikonduktor

yang memasukinya bila kedua radiasi tersebut mempunyai perbedaan energi lebih besar daripada 50 keV. Sedang detektor semikonduktor untuk radiasi gamma biasanya mempunyai resolusi 2 keV. Jadi terlihat bahwa detektor semikonduktor jauh lebih teliti untuk membedakan energi radiasi.

Sebenarnya, kemampuan untuk membedakan energi tidak terlalu diperlukan dalam pemakaian di lapangan, misalnya untuk melakukan survai radiasi. Akan tetapi untuk keperluan lain, misalnya untuk menentukan jenis radionuklida atau untuk menentukan jenis dan kadar bahan, kemampuan ini mutlak diperlukan.

Keunggulan - Kelemahan Detektor

Dari pembahasan di atas terlihat bahwa setiap radiasi akan diubah menjadi sebuah pulsa listrik dengan ketinggian yang sebanding dengan energi radiasinya. Hal tersebut merupakan fenomena yang sangat ideal karena pada kenyataannya tidaklah demikian. Terdapat beberapa karakteristik detektor yang membedakan satu jenis detektor dengan lainnya yaitu efisiensi, kecepatan dan resolusi.

Tabel berikut menunjukkan karakteristik beberapa jenis detektor secara umum berdasarkan beberapa pertimbangan di atas.

| Spesifikasi | Jenis Detektor | | |
|-------------|----------------|-----------|----------------|
| | Isian Gas | Sintilasi | Semi Konduktor |
| Efisiensi | Rendah | Tinggi | Rendah |
| Kecepatan | Rendah | Tinggi | Rendah |
| Resolusi | Rendah | Rendah | Tinggi |
| Konstruksi | Sederhana | Rumit | Rumit |

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Penggunaan Alat Ukur Radiasi

Berdasarkan kegunaannya, alat ukur radiasi dapat dibedakan menjadi

- a. Alat ukur proteksi radiasi
- b. Sistem pencacah dan spektroskopi

Alat ukur proteksi radiasi digunakan untuk kegiatan keselamatan kerja dengan radiasi, nilai yang ditampilkan dalam satuan dosis radiasi seperti Rontgent, rem, atau Sievert. Sedangkan sistem pencacah dan spektroskopi digunakan untuk melakukan pengukuran intensitas radiasi dan energi radiasi secara akurat. Sistem pencacah lebih banyak digunakan di fasilitas laboratorium.

tabel 3 :
Keunggulan
Kelemahan
Detektor

Alat Ukur Proteksi Radiasi

Sebagai suatu ketentuan yang diatur dalam undang-undang bahwa setiap pengguna zat radioaktif atau sumber radiasi pengion lainnya harus memiliki alat ukur proteksi radiasi. Alat ukur proteksi radiasi dibedakan menjadi tiga yaitu:

- a. Dosimeter perorangan
- b. Surveimeter
- c. Monitor kontaminasi.

Dosimeter perorangan digunakan untuk "mencatat" dosis radiasi yang diterima pekerja radiasi secara akumulasi dalam selang waktu tertentu, misalnya selama satu bulan. Contoh dosimeter perorangan adalah film badge, TLD dan dosimeter saku. Setiap pekerja radiasi diwajibkan menggunakan dosimeter perorangan.

Surveimeter digunakan untuk mengukur laju dosis (intensitas) radiasi secara langsung. Surveimeter mutlak diperlukan dalam setiap pekerjaan yang menggunakan zat radioaktif atau sumber radiasi pengion lainnya agar setiap pekerja mengetahui atau dapat memperkirakan dosis radiasi yang akan diterimanya setelah melaksanakan kegiatan tersebut. Surveimeter harus bersifat portabel, mudah dibawa dalam kegiatan survei radiasi di segala medan.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Monitor kontaminasi digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi zat radioaktif, baik di udara, di tempat kerja, maupun yang melekat di tangan, kaki atau badan pekerja. Peralatan ini mutlak diperlukan bagi fasilitas yang menggunakan zat radioaktif terbuka, misalnya untuk keperluan teknik perunit menggunakan zat radioaktif.

Sistem Pencacah dan Spektroskopi

Sistem pencacah dan spektroskopi digunakan untuk aplikasi yang memanfaatkan zat radioaktif atau sumber radiasi pengion lainnya. Sebagai contoh aplikasi thickness gauging untuk mengukur tebal lapisan, level gauging untuk menentukan batas permukaan fluida, XRF untuk menentukan jenis dan kadar material, dan sebagainya. Sistem pencacah digunakan untuk mengukur kuantitas (jumlah) radiasi yang mengenai detektor. Salah satu contoh penggunaan sistem pencacah adalah pada aplikasi pengukuran tebal kertas.

Sistem spektroskopi mempunyai prinsip yang sangat berbeda dengan pencacah karena alat ini mengukur energi dari setiap radiasi yang mengenai detektor. Hasil pengukuran alat ini berupa spektrum distribusi energi radiasi. Spektrum energi radiasi bersifat unik dan merupakan karakteristik dari setiap unsur atau zat radioaktif. Sehingga jenis unsur atau isotop yang terkandung di dalam suatu bahan dapat ditentukan bila spektrum energinya dapat diukur.

Salah satu contoh aplikasi yang harus menggunakan sistem spektroskopi adalah penentuan jenis dan kadar unsur yang menerapkan metode XRF (*X-ray fluorescence*) dan metode NAA (*neutron activation analysis*).

1.7

Alat Ukur Proteksi Radiasi

Surveimeter

Surveimeter harus dapat memberikan informasi laju dosis radiasi pada suatu area secara langsung. Jadi, seorang pekerja radiasi dapat memperkirakan jumlah radiasi yang akan diterimanya bila akan bekerja di suatu lokasi selama waktu tertentu. Dengan informasi yang ditunjukkan surveimeter ini,

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

setiap pekerja dapat menjaga diri agar tidak terkena paparan radiasi yang melebihi batas ambang yang diizinkan.

Sesuai fungsinya, sebuah surveimeter harus bersifat portable meskipun ukurannya tidak perlu sekecil sebuah dosimeter personal. Sebenarnya nilai yang terukur pada surveimeter adalah intensitas radiasi. Secara elektronik, nilai intensitas tersebut dikonversikan menjadi skala laju dosis, misalnya dengan satuan roentgen/jam.

Semua jenis detektor yang dapat memberikan hasil secara langsung, seperti detektor isian gas, sintilasi dan semikonduktor, dapat digunakan sebagai surveimeter. Dari segi praktis dan ekonomis, detektor isian gas Geiger Muller yang paling banyak digunakan. Detektor sintilasi juga banyak digunakan, khususnya NaI(Tl) untuk radiasi gamma, karena mempunyai efisiensi yang tinggi.

Jenis Surveimeter

Terdapat beberapa jenis surveimeter yang digunakan untuk jenis radiasi yang sesuai sebagai berikut.

- a. Surveimeter Gamma
- b. Surveimeter Beta dan Gamma
- c. Surveimeter Alpha
- d. Surveimeter neutron
- e. Surveimeter Multi-Guna

Surveimeter gamma merupakan surveimeter yang paling sering digunakan dan pada prinsipnya dapat digunakan untuk mengukur radiasi sinar X. Detektor yang sering digunakan adalah detektor isian gas proporsional, GM atau detektor sintilasi NaI(Tl).

Berbeda dengan surveimeter gamma biasa, surveimeter beta dan gamma mempunyai detektor yang terletak di luar badan surveimeter dan mempunyai "jendela" yang dapat dibuka atau ditutup. Bila digunakan untuk mengukur radiasi beta, maka jendelanya harus dibuka. Sebaliknya untuk radiasi gamma, jendelanya ditutup. Detektor yang sering digunakan adalah detektor isian gas proporsional atau GM.

Surveimeter alpha mempunyai detektor yang terletak di luar badan surveimeter dan terdapat satu permukaan detektor yang terbuat dari lapisan film yang sangat tipis, biasanya terbuat dari beryllium, sehingga mudah sobek bila tersentuh atau tergores benda tajam. Detektor yang digunakan adalah detektor isian gas proporsional atau detektor sintilasi ZnS(Ag).



gambar 41.
Jenis Surveimeter

Surveimeter neutron biasanya menggunakan detektor proporsional yang diisi dengan gas BF_3 atau gas Helium. Karena yang dapat berinteraksi dengan unsur Boron atau Helium adalah neutron termal saja, maka surveimeter neutron biasanya dilengkapi dengan moderator yang terbuat dari parafin atau polietilen yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat menjadi neutron termal. Moderator ini hanya digunakan bila radiasi neutron yang akan diukur adalah neutron cepat.

Pada saat ini sudah mulai dipasarkan jenis surveimeter yang serbaguna (multipurpose) karena selain dapat mengukur intensitas radiasi secara langsung, sebagaimana surveimeter biasa, juga dapat mengukur intensitas radiasi selama selang waktu tertentu, dapat diatur, seperti sistem pencacah dan bahkan bisa menghasilkan spektrum distribusi energi radiasi seperti sistem spektroskopi.

Dosimeter Personal

Alat ini digunakan untuk mengukur dosis radiasi secara akumulasi. Jadi, dosis radiasi yang mengenai dosimeter personal akan dijumlahkan dengan dosis yang telah mengenai sebelumnya. Dosimeter personal ini harus ringan dan berukuran kecil karena alat ini harus selalu dikenakan oleh setiap pekerja radiasi yang sedang bekerja di medan radiasi.

Terdapat tiga macam dosimeter personal yang banyak digunakan saat ini yaitu:

- a. Dosimeter saku (*pen / pocket dosimeter*)
- b. Film badge
- c. *Thermoluminescence Dosemeter* (TLD).

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

a. Dosimeter Saku

Dosimeter ini sebenarnya merupakan detektor kamar ionisasi sehingga prinsip kerjanya sama dengan detektor isian gas akan tetapi tidak menghasilkan respon secara langsung karena muatan yang terkumpul pada proses ionisasi akan "disimpan" seperti halnya suatu kapasitor.

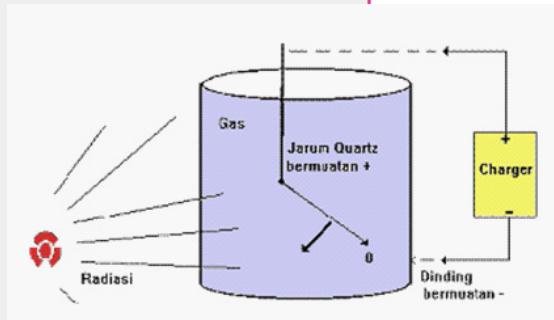
Konstruksi dosimeter saku berupa tabung silinder berisi gas seperti ditampilkan pada Gambar 42. Dinding silinder akan berfungsi sebagai katoda, bermuatan negatif, sedangkan sumbu logam dengan jarum 'quartz' di bagian bawahnya bermuatan positif. Mula-mula, sebelum digunakan, dosimeter ini diberi muatan menggunakan charger agar menunjukkan angka nol.

Dalam pemakaian di tempat kerja, ketika terkena radiasi maka akan terbentuk ion positif dan negatif, sehingga mengurangi perbedaan potensial antara jarum dan dinding detektor. Perubahan perbedaan potensial ini menyebabkan penyimpangan jarum berkurang. Skala dari penyimpangan jarum tersebut kemudian dikonversikan menjadi nilai dosis.

Keuntungan dosimeter saku ini adalah dapat dibaca secara langsung dan tidak membutuhkan peralatan tambahan untuk pembacaannya. Kelemahannya, dosimeter ini tidak dapat menyimpan informasi dosis yang telah mengenainya dalam waktu yang lama (sifat akumulasi kurang baik).

Pada saat ini, sudah dibuat dan dipasarkan dosimeter saku yang diintegrasikan dengan komponen elektronika maju (*advanced components*) sehingga skala pembacaannya tidak lagi dengan melihat pergeseran jarum (secara mekanik) melainkan dengan melihat display digital yang dapat langsung menampilkan angka hasil pengukurannya.

gambar 42.
Prinsip Kerja
Dosimeter Saku



b. Film Badge

Film badge terdiri atas dua bagian yaitu detektor film dan holder. Detektor film dapat "menyimpan" dosis radiasi yang telah mengenainya secara

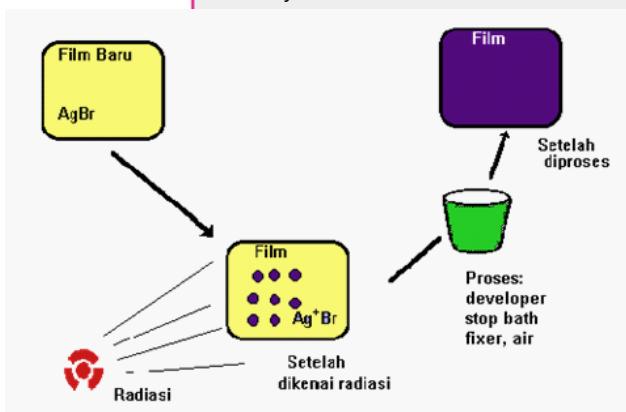
gambar 43.
Prinsip Kerja Film
Badge

akumulasi selama film belum diproses. Semakin banyak dosis radiasi yang telah mengenainya atau telah mengenai orang yang memakainya maka tingkat kehitaman film setelah diproses akan semakin pekat.

Holder film selain berfungsi sebagai tempat film ketika digunakan juga berfungsi sebagai penyaring (filter) energi radiasi. Dengan adanya beberapa jenis filter pada holder, maka dosimeter film badge ini dapat membedakan jenis dan energi radiasi yang telah mengenainya.

Di pasar terdapat beberapa merk film maupun holder, tetapi yang sering digunakan adalah film dengan merk Kodak buatan USA dan holder merk Chiyoda buatan Jepang seperti pada Gambar 44. Hal ini dilakukan agar mempunyai standar atau kalibrasi pembacaan yang tetap.

Dosimeter film badge ini mempunyai sifat akumulasi yang lebih baik daripada dosimeter saku. Keuntungan lainnya film badge dapat membedakan jenis radiasi yang mengenainya dan mempunyai rentang pengukuran energi yang lebih besar daripada dosimeter saku. Kelemahannya, untuk mengetahui dosis yang telah mengenainya harus diproses secara khusus dan membutuhkan peralatan tambahan untuk membaca tingkat kehitaman film, yaitu densitometer.



c. Dosimeter Termoluminesensi (TLD)

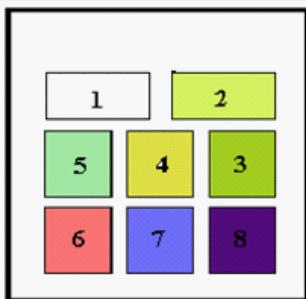
Dosimeter ini memiliki kemiripan dengan dosimeter film badge, hanya detektor yang digunakan adalah kristal anorganik thermoluminesensi, misalnya bahan LiF. Proses yang terjadi pada bahan ini bila dikenai radiasi adalah proses termoluminesensi. Senyawa lain yang sering digunakan untuk TLD adalah CaSO_4 .

Dosimeter ini digunakan selama jangka waktu tertentu, misalnya satu bulan, baru kemudian diproses untuk mengetahui jumlah dosis radiasi yang telah diterimanya. Pemrosesan dilakukan dengan memanaskan kristal TLD sampai temperatur tertentu, kemudian mendeteksi percikan-percikan cahaya yang dipancarkannya. Alat

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

yang digunakan untuk memproses dosimeter ini adalah TLD reader.

Keunggulan TLD dibandingkan dengan film badge adalah terletak pada



Keterangan

- 1 : tanpa filter
- 2 : plastik (0,5 mm)
- 3 : plastik (1,5 mm)
- 4 : plastik (3,0 mm)
- 5 : Aluminium (0,6 mm)
- 6 : Tembaga (0,3 mm)
- 7 : Sn (0,8 mm) + Pb (0,4 mm)
- 8 : Cd (0,8 mm) + Pb (0,4 mm)

gambar 44.
Contoh Film
Badge

ketelitiannya. Selain itu, ukuran kristal TLD relatif lebih kecil dan setelah diproses kristal TLD tersebut dapat digunakan lagi.

Monitor Kontaminasi

Kontaminasi merupakan suatu masalah yang sangat berbahaya, apalagi kalau sampai terjadi di dalam tubuh. Kontaminasi sangat mudah terjadi kalau bekerja dengan sumber radiasi terbuka, misalnya berbentuk cair, serbuk, atau gas. Adapun yang terkontaminasi biasanya adalah peralatan, meja kerja, lantai, tangan, sepatu.

Jika intensitas radiasi yang dipancarkan oleh sesuatu yang telah terkontaminasi sangat rendah, maka alat ukur ini harus mempunyai efisiensi pencacahan yang sangat tinggi. Detektor yang digunakan untuk monitor kontaminasi ini harus mempunyai "jendela" (*window*) yang luas, karena kontaminasi tidak selalu terjadi pada satu daerah tertentu, melainkan tersebar pada permukaan yang luas. Tampilan dari monitor kontaminasi ini biasanya menunjukkan kuantitas radiasi (laju cacah) seperti cacah per menit atau cacah per sekon (cps). Nilai ini harus dikonversikan menjadi satuan aktivitas radiasi, Curie atau Becquerel.

Monitor kontaminasi dapat dibedakan menjadi tiga yaitu monitor kontaminasi permukaan, monitor kontaminasi perorangan dan monitor

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

gambar 45.
Monitor
Kontaminasi



kontaminasi udara (*airborne*). Monitor kontaminasi permukaan (*surface monitor*) digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi segala permukaan, misalnya meja kerja, lantai, alat ukur ataupun baju kerja.

Monitor kontaminasi perorangan digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi pada bagian-bagian tubuh dari pekerja radiasi. Bagian tubuh yang paling sering terkontaminasi adalah tangan dan kaki, sehingga terdapat monitor kontaminasi khusus untuk tangan dan kaki yaitu hand and foot contamination monitor. Suatu instalasi yang modern biasanya dilengkapi dengan monitor kontaminasi seluruh tubuh (*whole body monitor*). Setiap

pekerja yang akan meninggalkan tempat kerja harus diperiksa terlebih dahulu dengan monitor kontaminasi.

Monitor kontaminasi udara digunakan untuk mengukur tingkat radioaktivitas udara di sekitar instalasi nuklir yang mempunyai potensi untuk melepaskan zat radioaktif ke udara.

Sama seperti surveimeter, detektor yang digunakan di sini dapat berupa detektor isian gas, sintilasi ataupun semikonduktor. Detektor yang paling banyak digunakan

adalah detektor isian gas proporsional untuk mendeteksi kontaminasi pemancar alpha atau beta dan detektor sintilasi NaI(Tl) untuk kontaminasi pemancar gamma. Khusus untuk monitor kontaminasi udara biasanya dilengkapi dengan suatu penyaring (filter) dan pompa penghisap udara untuk "menangkap" partikulat zat radioaktif yang bercampur dengan molekul-molekul udara.

1.8

Sistem Pencacah dan Spektroskopi

Dalam pengukuran suatu besaran fisis selalu diperlukan beberapa komponen peralatan yang membentuk suatu sistem, demikian pula untuk melakukan pengukuran radiasi nuklir. Sistem pencacah radiasi yang akan dibahas disini merupakan susunan peralatan yang digunakan untuk mengukur radiasi

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

nuklir, yang terdiri atas:

- Detektor dan
- Peralatan penunjang

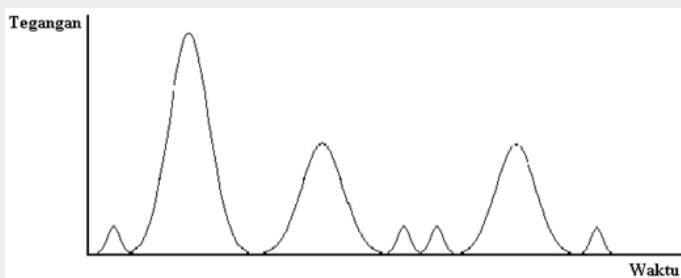
Detektor berfungsi untuk mengubah energi nuklir menjadi energi lain yang lebih mudah untuk diolah, seperti energi listrik, sedangkan peralatan penunjang berfungsi untuk mengolah sinyal listrik yang dihasilkan oleh detektor menjadi suatu informasi yang mempunyai arti bagi pekerja.

Detektor

Detektor merupakan bagian yang sangat penting dari suatu sistem pencacah radiasi karena alat ini berfungsi untuk menangkap radiasi dan mengubahnya menjadi sinyal atau pulsa listrik.

Terdapat dua besaran yang biasa diukur dari suatu paparan radiasi nuklir yaitu jumlah radiasi dan energi radiasi. Jumlah radiasi diperlukan untuk mengetahui aktivitas sumber radiasi, sedangkan energi radiasi digunakan untuk menentukan jenis sumber radiasi.

Setiap radiasi yang mengenai detektor akan diubah menjadi sebuah sinyal (pulsa) listrik sehingga jumlah radiasi dapat ditentukan dengan mengukur



gambar 46.
Sinyal Pulsa
Listrik Detektor

jumlah pulsa listrik yang dihasilkan detektor. Tinggi sinyal (pulsa) listrik yang dihasilkan detektor menunjukkan energi radiasi yang mengenai detektor sehingga energi radiasi dapat ditentukan dengan mengukur tinggi pulsa listrik yang dihasilkan detektor.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

gambar 47. Susunan detektor dan peralatan penunjang yang dapat dikonfigurasikan menjadi suatu sistem pencacah atau sistem spektroskopi



Dari gambar 46 dapat dilihat bahwa terdapat tujuh buah radiasi yang mengenai detektor, empat radiasi mempunyai energi rendah, dua radiasi mempunyai energi sedang dan sebuah radiasi yang mempunyai energi tinggi.

Peralatan Penunjang (Instrumentasi Nuklir)

Sinyal listrik yang dihasilkan oleh detektor perlu diproses lebih lanjut agar dapat diamati oleh manusia, misalnya ditampilkan melalui peraga, suara atau bahkan fasilitas pengolah sinyal yang lebih canggih. Peralatan yang diperlukan untuk melengkapi detektor guna membentuk suatu sistem pencacah disebut sebagai peralatan penunjang (instrumentasi nuklir).

Peralatan penunjang harus bersifat linier, artinya setiap informasi yang dihasilkan oleh peralatan penunjang, baik jumlah pulsa maupun tinggi pulsa harus sebanding dengan informasi yang diterimanya dari detektor. Linieritas merupakan parameter yang sangat mempengaruhi unjuk kerja dari suatu sistem pencacah.

Berdasarkan peralatan penunjangnya, suatu sistem pencacah radiasi dapat dibedakan menjadi dua yaitu

- a. Sistem pencacah
- b. Sistem spektroskopi

Sistem pencacah mempunyai fungsi untuk mengukur jumlah (kuantitas) radiasi yang mengenainya. Sistem spektroskopi mempunyai fungsi yang berbeda yaitu mengukur energi radiasi, atau lebih tepatnya mengukur distribusi energi dari radiasi yang mengenai detektor.

Sebenarnya sistem pencacah diferensial juga dapat berfungsi sebagai sistem spektroskopi tetapi dengan resolusi yang sangat rendah. Sebaliknya sistem spektroskopi juga dapat berfungsi sebagai sistem pencacah tetapi dengan "kecepatan" yang lebih rendah.

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

Sistem Pencacah

Sistem pencacah dapat dibedakan menjadi sistem pencacah integral dan sistem pencacah differensial. Keduanya mempunyai fungsi yang hampir sama yaitu mengukur jumlah (kuantitas) radiasi yang mengenainya. Perbedaannya, sistem pencacah integral tidak membedakan energi radiasi yang datang sedangkan sistem pencacah differensial hanya mengukur radiasi yang mempunyai energi tertentu saja.

a. Sistem Pencacah Integral

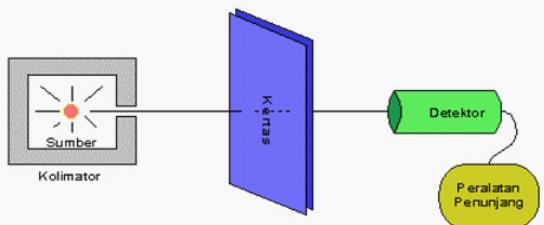
Pencacahan secara integral merupakan suatu cara untuk mengukur jumlah (kuantitas) radiasi yang memasuki detektor tanpa memperhatikan tingkat energi radiasinya (gross activity). Sistem pencacah akan menampilkan suatu nilai yang sebanding dengan kuantitas radiasi yang memasuki detektor.

b. Sistem Pencacah Diferensial

Pencacah differensial digunakan untuk mengukur jumlah radiasi dalam selang energi tertentu. Sebagai contoh, dua jenis zat radioaktif yang berbeda akan memancarkan radiasi dengan tingkat energi yang berbeda sehingga bila ingin mengukur aktivitas salah satu zat radioaktif tersebut maka diperlukan suatu sistem pencacah differensial.

Dari gambar 48 terlihat bahwa intensitas radiasi yang diterima detektor akan bergantung pada tebal kertas yang dilaluinya. Semakin tebal kertasnya semakin kecil intensitas radiasinya.

gambar 48.
Penggunaan
sistem pencacah
pada aplikasi
pengukuran
tebal kertas
(atau lapisan tipis
lainnya misalnya
plastik)



Sistem Spektroskopi

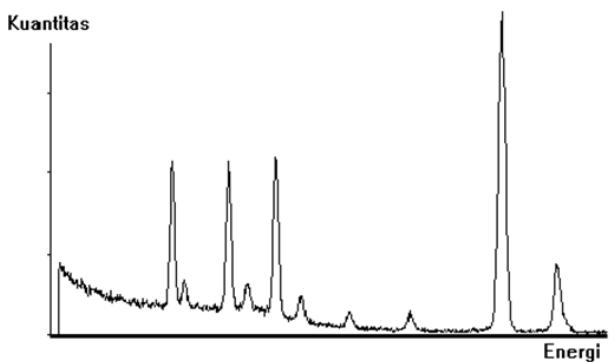
Sistem spektroskopi sebenarnya juga melakukan pencacahan sebagaimana sistem pencacah differensial akan tetapi dengan selang energi yang sangat sempit sehingga dapat dikatakan melakukan pencacahan (jumlah radiasi) pada setiap "tingkat" energi. Hasil pencacahan tersebut ditampilkan sebagai suatu grafik antara jumlah radiasi (sumbu Y) terhadap energi radiasi (sumbu

Bab 1 Atom, Inti dan Radioaktivitas

gambar 49. Hasil Pencacahan Sistem Spektroskopi

X) yang sering disebut sebagai spektrum radiasi, seperti contoh pada gambar berikut.

Memang suatu spektrum radiasi dapat saja diperoleh menggunakan suatu sistem pencacah diferensial dengan mode SCA (*single channel analyzer*), sebagaimana dilakukan pada era sebelum tahun 70-an. Saat ini, atau setelah ditemukannya teknologi ADC (*analog to digital converter*), sistem spektroskopi sudah tidak lagi memakai mode SCA melainkan menggunakan peralatan yang disebut sebagai MCA (*multi channel analyzer*).



Detektor terbaik untuk keperluan ini adalah detektor semikonduktor karena mempunyai noise yang lebih kecil (*low noise*) dibandingkan detektor yang lain, sehingga lebih teliti dalam membedakan energi radiasi. Sebagai contoh detektor yang digunakan untuk radiasi gamma adalah detektor HPGe (*High Purity Germanium*) sedangkan untuk radiasi sinar-X adalah detektor SiLi atau LEGe.

Spektrum energi radiasi (sebagaimana contoh diatas) bersifat unik dan merupakan karakteristik dari radionuklida yang memancarkannya. Oleh karena itu, jenis unsur yang dikandung oleh suatu bahan dapat diidentifikasi berdasarkan puncak-puncak energi yang terdapat pada spektrum energi radiasi yang dipancarkan oleh bahan tersebut. Selain itu, kadar dari setiap unsur juga dapat ditentukan berdasarkan luas dari masing-masing puncak energinya.

Dua metode analisis kualitatif dan kuantitatif unsur yang sering diterapkan adalah metode XRF (*X-ray fluorescence*) dan NAA (*Neutron activation analysis*).

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

2.1

Radiasi dan Kita

Biologi radiasi atau dikenal juga sebagai radiobiologi adalah cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang interaksi radiasi dengan sistem biologi. Dalam dimensi kehidupan, sel adalah unit fungsional terkecil dalam tubuh yang mengandung senyawa organik dan anorganik, dengan dua komponen penyusun utama yaitu sitoplasma sebagai pendukung semua fungsi metabolisme dan inti sel yang mengandung materi genetik.

Radiasi adalah energi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel. Keberadaan radiasi tidak dapat dilihat, tidak dapat tercium karena tidak berbau, tidak dapat didengar, dan tidak dapat dirasa, tetapi hanya dapat dideteksi dengan alat detektor radiasi.

Berdasarkan tingkat energi yang dimiliki, radiasi dapat dibedakan atas radiasi non pengion dan pengion. Radiasi non pengion yang berupa gelombang elektromagnetik adalah radiasi dengan energi yang tidak cukup untuk menyebabkan terjadinya ionisasi pada materi yang dilintasinya. Sedangkan radiasi pengion yang dapat berupa partikel dan gelombang elektromagnetik merupakan radiasi dengan energi yang besar sehingga mampu untuk melakukan ionisasi dan eksitasi pada materi yang dilintasinya. Pada modul ini hanya akan dibahas tentang interaksi radiasi pengion dengan materi biologi termasuk efek yang ditimbulkan pada tubuh.

Radiasi telah ada sejak terbentuknya alam semesta dan menjadi bagian dari kehidupan makhluk hidup. Radiasi akan selalu ada di sekitar kita sepanjang waktu dan tidak mungkin untuk dihindari. Sumber radiasi terdapat pada tanah yang kita injak, udara yang kita hirup, makanan yang kita makan, dan sistem tata surya. Berdasarkan sumbernya, radiasi dapat dibedakan atas radiasi alam atau latar yang sudah ada di alam sejak pembentukannya dan radiasi buatan yang sumbernya dibuat oleh manusia dengan sengaja. Selama hidupnya manusia paling besar menerima paparan radiasi dari alam khususnya gas radon. Sumber utama radiasi alam adalah radiasi kosmik yang berasal dari benda langit di dalam dan luar tata surya, radiasi terrestrial yang berasal dari kerak bumi/tanah dan radiasi internal yang berasal dari sejumlah radionuklida yang ada di dalam tubuh manusia.

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

Radiasi kosmik berasal dari angkasa luar yang terdiri dari partikel dan sinar berenergi tinggi (1017 eV) dan berinteraksi dengan inti atom stabil di atmosfer membentuk inti radioaktif seperti C-14, Be-7, Na-22, dan H-3. Radionuklida yang terbentuk sebagai akibat dari interaksi dengan radiasi kosmik disebut radionuklida kosmogenik. Tingkat radiasi kosmik bergantung pada ketinggian artinya radiasi yang diterima oleh tubuh akan lebih besar apabila berada di tempat yang lebih tinggi. Besarnya radiasi yang diterima manusia juga ditentukan oleh garis lintangnya di bumi karena radiasi kosmik dipengaruhi pula oleh medan magnet bumi. Dengan demikian, tingkat radiasi di kutub lebih kecil dari di katulistiwa karena medan magnet bumi di kutub lebih kuat.

Secara alamiah, radiasi terestrial dipancarkan oleh radionuklida yang ada di dalam kerak bumi yang disebut dengan radionuklida primordial dengan waktu paro berorde miliar tahun. Radionuklida primordial adalah U-238 (4,5 miliar tahun), K-40 (1,3 miliar tahun), dan Th-232 (14 miliar tahun). Dalam setiap proses peluruhan berantai dari radionuklida ini akan dipancarkan radiasi alpha, beta, dan gamma dengan berbagai tingkatan energi.

Rerata paparan radiasi alam yang diterima manusia secara eksternal dan internal adalah sekitar 2,5 mSv/tahun. Paparan eksternal berasal dari sumber radionuklida primordial dalam tanah (20%) dan radiasi kosmik (17%), sedangkan paparan internal berasal dari gas Radon-222 (Rn-222) dan Thoron (Ra-220) sebagai penyumbang paling besar yaitu sekitar 20%, Kalium-40 (K-40) 8%, dan U-238 beserta Th-232 dan turunannya sekitar 4%. Manusia paling besar menerima radiasi terestrial yang berasal dari radionuklida bentuk gas yaitu Ra-222 dan thoron (Ra-220) dengan besaran yang berbeda-beda bergantung pada konsentrasi sumber radiasi di dalam kerak bumi. Dalam tubuh manusia mengandung radionuklida yang berasal dari alam yang dapat masuk melalui makanan, minuman, udara yang dihisap, dan luka pada kulit. Radionuklida yang dimaksud ditampilkan pada Tabel 4 termasuk aktivitas total dalam tubuh.

Pembuatan sumber radiasi diawali dengan penemuan sinar-x oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895. Sumber radiasi buatan dapat berupa zat radioaktif, pesawat sinar-X, akselerator, maupun reaktor nuklir. Unsur radioaktif berhasil dibuat manusia berdasarkan reaksi inti antara nuklida stabil dengan neutron dalam reaktor dan aktivasi neutron, dan juga berdasarkan penembakan nuklida stabil dengan partikel atau ion cepat pada

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

alat pemercepat partikel seperti akselektor dan siklotron. Radionuklida buatan dapat memancarkan radiasi alpha, beta, gamma, atau neutron.

| Nuklida | Massa total dalam tubuh | Aktivitas total dalam tubuh | Masukan harian |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|
| Uranium | 90 µg | 30 pCi (1,1 Bq) | 1,9 µg |
| Thorium | 30 µg | 3 pCi (0,11 Bq) | 3 µg |
| Kalsium-40 | 17 mg | 120 nCi (4,4 kBq) | 0,39 mg |
| Radium | 31 pg | 30 pCi (1,1 Bq) | 2,3 pg |
| Carbon-14 | 95 µg | 0,4 µCi (15 kBq) | 1,8 µg |
| Tritium | 0,06 pg | 0,6 nCi (23 Bq) | 0,003 pg |
| Polonium | 0,2 pg | 1 nCi (37 Bq) | 0,6 µg |

Sumber radiasi buatan sudah dimanfaatkan secara luas hampir disemua bidang antara lain kesehatan, pangan, dan industri. Besaran rerata dosis ekivalen total radiasi yang diterima manusia yang berasal dari paparan radiasi alam dan buatan diperkirakan sekitar 360 mrem dalam setahun dengan rincian pada Gambar 50.

Interaksi Radiasi Dengan Tubuh

Interaksi radiasi dengan materi biologi diawali dengan terjadinya interaksi fisik yaitu terjadinya proses eksitasi dan/atau ionisasi, yang diikuti dengan interaksi fisikokimia, respon biologi dan diakhiri dengan timbulnya efek radiasi.

Elektron sekunder yang dihasilkan dari proses ionisasi akan berinteraksi secara langsung maupun tidak langsung. Secara langsung bila penyerapan energi dari elektron tersebut langsung terjadi pada molekul organik di dalam sel yang mempunyai arti biologi penting, seperti DNA. Sedangkan interaksi secara tidak langsung bila terlebih dahulu terjadi interaksi radiasi dengan molekul air di dalam sel yang efeknya kemudian akan mengenai molekul organik penting.

Interaksi fisikokimia ini dapat menimbulkan kerusakan lebih lanjut pada sel yang akhirnya menimbulkan efek biologis yang dapat diamati. Semakin besar dosis radiasi yang diterima, semakin besar tingkat keparahan efek segera yang timbul, semakin besar kemungkinan terjadinya efek tertunda beberapa waktu kemudian.

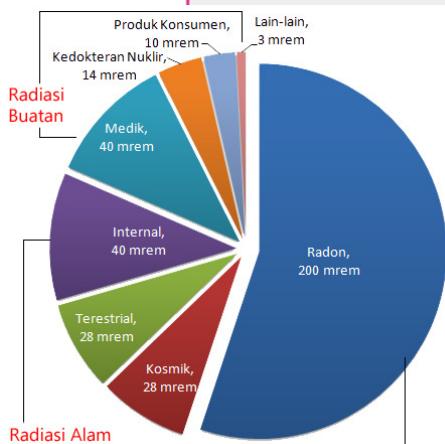
Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

tabel 4.
Radioaktivitas
alamiah dalam
tubuh manusia
dengan berat
70 kg

Radiasi pengion dapat mengionisasi materi biologi yang dilewatinya baik secara langsung maupun tidak langsung, dan menyebabkan perubahan pada tingkat molekuler, seluler, jaringan, organ, dan sistemik tubuh. Perubahan yang ditimbulkan pada tingkat genom, kromosom, dan DNA atau gen dikenal dengan istilah mutasi.

Telah dipahami bahwa molekul DNA adalah critical target dari paparan radiasi pada tubuh. Selain mutasi DNA, radiasi pengion dapat pula menyebabkan mutasi pada kromosom, dan juga sel yang menimbulkan terbentuknya sel tidak normal yang mengalami transformasi dan tetap hidup dalam tubuh.

Secara mendasar tidak terdapat perbedaan antara mutasi yang terjadi secara alami dan mutasi hasil interaksi radiasi. Keduanya dapat menimbulkan variasi genetik yang dijadikan sebagai dasar seleksi baik secara alami (evolusi) maupun secara buatan. Radiasi pengion tidak menyebabkan terjadinya suatu mutasi baru tetapi berpotensi menambah jumlah dari mutasi yang sudah ada.



gambar 50.
Besaran dosis
ekivalen yang
diterima manusia
dari paparan
radiasi alam dan
radiasi buatan

Interaksi Radiasi Dengan Molekul Air (Radiolisis Air)

Penyerapan energi radiasi oleh molekul air menyebabkan terjadinya mekanisme dekomposisi air yang disebut dengan radiolisis air menghasilkan ion radikal yang kemudian menjadi radikal bebas (H^{\bullet} dan OH^{\bullet}). Radikal bebas adalah suatu atom atau molekul yang bebas, tidak bermuatan dan mempunyai sebuah elektron yang tidak berpasangan pada orbit terluarnya. Keadaan ini menyebabkan radikal bebas menjadi tidak stabil (berumur 10^{-5} detik), sangat reaktif, dan toksik terhadap molekul organik vital tubuh. Radikal bebas yang terbentuk dapat saling bereaksi menghasilkan suatu molekul hidrogen peroksida yang stabil dan toksik. Mengingat sekitar 80% dari tubuh manusia terdiri dari air, maka sebagian besar interaksi radiasi dalam tubuh terjadi secara tidak langsung.

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

Interaksi Radiasi Dengan DNA (Mutasi DNA dan Gen)

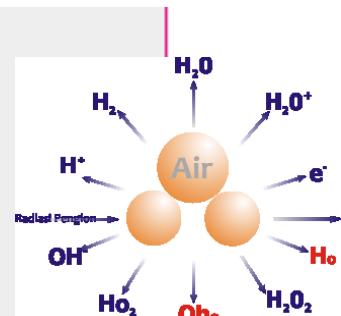
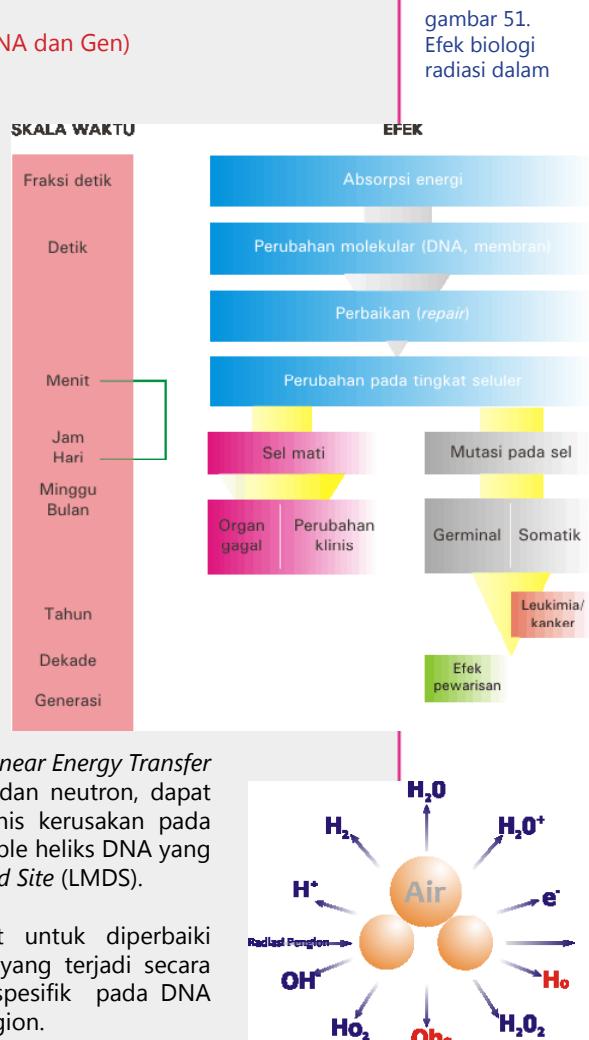
Kerusakan pada DNA atau mutasi DNA sebagai akibat radiasi pengion dapat menyebabkan terjadinya perubahan atau kerusakan pada struktur molekul basa dan gula, pembentukan dimer (*pyrimidine dimer*), putusnya ikatan hidrogen antar basa, hilangnya gula atau basa dan lainnya. Kerusakan yang lebih parah adalah putusnya salah satu untai DNA yang disebut single strand break dan putusnya kedua untai DNA pada posisi yang berhadapan yang disebut *double strand breaks*.

Secara alamiah sel mempunyai kemampuan untuk melakukan proses perbaikan terhadap kerusakan pada DNA dalam batas normal dengan menggunakan beberapa jenis enzim yang spesifik.

Jenis radiasi dengan kemampuan untuk mentransfer energi (eV) per mikrometer lintasan dalam materi atau *Linear Energy Transfer* (LET) yang tinggi seperti radiasi alpha dan neutron, dapat mengakibatkan terjadinya beberapa jenis kerusakan pada suatu lokasi tertentu dalam struktur double heliks DNA yang disebut dengan *Locally Multiply Damaged Site* (LMDS).

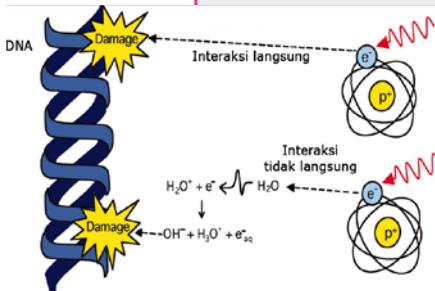
Kumpulan kerusakan ini sangat sulit untuk diperbaiki dibandingkan dengan kerusakan DNA yang terjadi secara random. LMDS merupakan kerusakan spesifik pada DNA yang hanya disebabkan oleh radiasi pengion.

Secara alamiah dan spontan, kerusakan pada struktur DNA akan segera mengalami proses perbaikan yang berlangsung tanpa kesalahan sehingga struktur DNA kembali seperti semula dan tidak



gambar 51.
Efek biologi
radiasi dalam

gambar 52.
Radikal bebas
(H[•] dan OH[•])
sebagai hasil
interaksi radiasi
dengan molekul
air



gambar 53.
Interaksi langsung dan tidak langsung antara photon dengan materi genetik

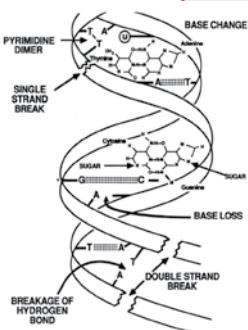
gambar 54.
Kerusakan pada struktur DNA akibat paparan radiasi pengion dari yang paling sederhana sampai double strand breaks

menimbulkan perubahan fungsi pada sel. Tetapi dalam kondisi tertentu, proses perbaikan DNA tidak berjalan sebagaimana mestinya sehingga walaupun kerusakan dapat diperbaiki tetapi hasil perbaikan tidak tepat dan tidak sempurna sehingga menghasilkan DNA dengan struktur yang berbeda.

Interaksi Radiasi Dengan Kromosom (Mutasi Kromosom dan Genom)

Radiasi dapat menginduksi mutasi pada kromosom dengan terjadinya perubahan pada struktur kromosom (aberasi kromosom) dan mutasi pada genom dengan terjadinya perubahan jumlah kromosom dalam genom sel. Aberasi kromosom yang diinduksi oleh radiasi pengion dapat berupa fragmen asentrik, dilesi, kromosom cincin (*ring*), kromosom disentrik, inversi, dan translokasi. Di antara jenis kerusakan struktur kromosom, disentrik adalah yang paling spesifik akibat radiasi.

Kromosom disentrik dan cincin merupakan aberasi kromosom yang bersifat tidak stabil karena sel yang mengandung kromosom ini akan mengalami kematian ketika melakukan pembelahan sel. Kromosom translokasi merupakan aberasi kromosom yang bersifat stabil yang menginisiasi terjadinya transformasi pada sel normal menjadi sel mutan yang tetap hidup dalam tubuh sebagai sel tidak normal. Kromosom translokasi ini tidak hilang dengan bertambahnya waktu karena sel yang mengandung kromosom bentuk ini tidak mati ketika melakukan pembelahan sel.

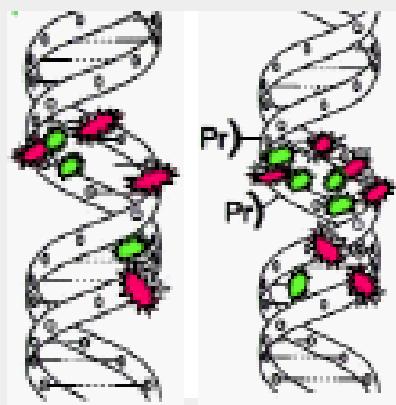


Pembentukan sel transforman ini berpotensi menginduksi proses pembentukan kanker (*karsinogenesis*) yang diinisiasi oleh radiasi pengion. Tetapi karsinogenesis tidak akan berlanjut sampai terbentuk kanker bila tidak disertai dengan adanya keterlibatan karsinogen lain baik kimia maupun biologi.

Interaksi Radiasi Dengan Sel

Kerusakan yang terjadi pada DNA dan kromosom sel akan menghasilkan 3 (tiga) konsekuensi yaitu sel hidup yang normal, sel hidup yang tidak

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi



normal, atau sel mati. Bila proses perbaikan terhadap kerusakan DNA berlangsung dengan baik dan tepat/sempurna dan juga tingkat kerusakan yang dialami tidak terlalu parah, maka sel bisa kembali normal seperti keadaannya sebelum terpajang radiasi. Bila proses perbaikan berlangsung tetapi tidak tepat sehingga masih ada kerusakan DNA yang tersisa, maka akan dihasilkan sel yang tetap hidup tetapi telah mengalami perubahan dan tidak normal. Artinya sel tersebut menjadi sel yang baru atau transforman. Selain itu, bila tingkat kerusakan yang dialami sel sangat parah atau bila proses perbaikan DNA tidak berlangsung dengan baik maka sel akan mati.

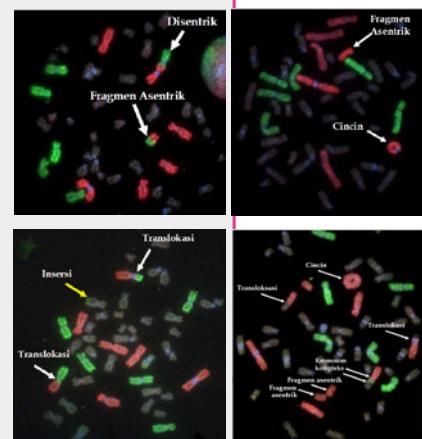
gambar 55.
Locally Multiply Damaged Site
pada struktur DNA akibat radiasi pengion.

gambar 56.
(searah jarum jam)
Kromosom disentrik dan fragmen asentrik
Kromosom cincin dan fragmen asentrik
Translokasi dan insersi
Aberasi kromosom kompleks pada sebuah sel

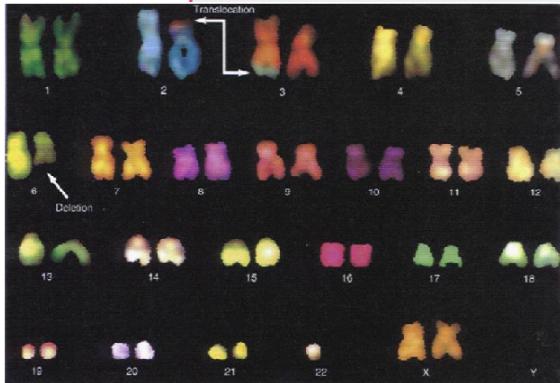
2.2 Efek Radiasi Pengion Pada Tubuh

Manusia dalam kehidupannya tidak akan pernah bisa lepas dari paparan radiasi pengion baik secara eksterna maupun interna. Paparan radiasi eksterna adalah paparan yang berasal dari sumber radiasi yang ada di luar tubuh dan terdapat jarak antara sumber radiasi dengan tubuh. sedangkan paparan radiasi interna terjadi bila sumber radiasi berada dalam tubuh dan juga berada atau menempel pada permukaan luar tubuh. Berarti tidak ada jarak antara sumber radiasi dengan tubuh yang disebut sebagai kontaminasi.

Kontaminasi dapat dibedakan atas eksternal dan internal. kontaminasi eksternal terjadi bila materi radioaktif menempel pada permukaan kulit, sedangkan kontaminasi



Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi



gambar 57.

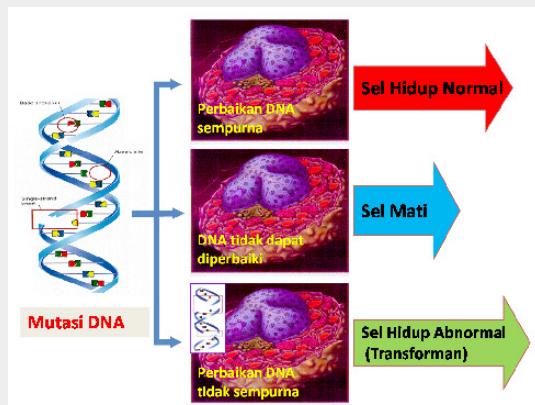
Kariotip kromosom pada sebuah sel yang menunjukkan adanya translokasi pada kromosom nomor 2 dan 3, dan delesi pada kromosom nomor 6

gambar 58.
Konsekuensi pada sel akibat kerusakan pada DNA oleh paparan radiasi pengion

internal terjadi bila bahan radionuklida masuk ke dalam tubuh baik melalui jalur pernafasan (*inhalasi*), penelanjan (*ingesi*), maupun melalui kulit terbuka/luka atau penyerapan kulit yang utuh (khusus tritium). Individu yang terkontaminasi eksternal berpotensi besar untuk terkontaminasi internal secara alamiah. Tubuh manusia mengandung beberapa materi radioaktif dengan jumlah dan tingkat aktivitas dalam batas normal yang tidak berbahaya bagi kesehatan tubuh.

Kontaminasi internal dapat terjadi secara akut maupun kronis, langsung maupun tidak langsung (melalui beberapa perantara pada jalur masuk). Empat tahapan berlangsungnya kontaminasi internal yaitu (1) masuk tubuh melalui jalan masuk; (2) peyerapan ke dalam darah atau cairan getah bening; (3) distribusi ke dalam tubuh dan akumulasi pada organ sasaran; dan (4) pengeluaran melalui urin, feses atau keringat.

Selain besaran dosis atau radioaktivitas, tingkat kerusakan akibat radiasi yang ditimbulkan pada tubuh sangat bergantung antara lain pada jenis atau kualitas radiasi karena mempunyai daya tembus dan tingkat ionisasi yang berbeda pada materi biologi. Partikel alpha, karena massa yang besar dan bermuatan positif, tidak dapat menembus lapisan sel basal kulit sehat. Kisaran lintasan partikel alpha (4 – 7 MeV) di udara sekitar 1 – 10 cm sedangkan pada jaringan tubuh tidak lebih dari 0,1 mm. Partikel beta (0 – 7 MeV) dapat melintas di udara sampai sekitar 10 m dan pada jaringan



Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

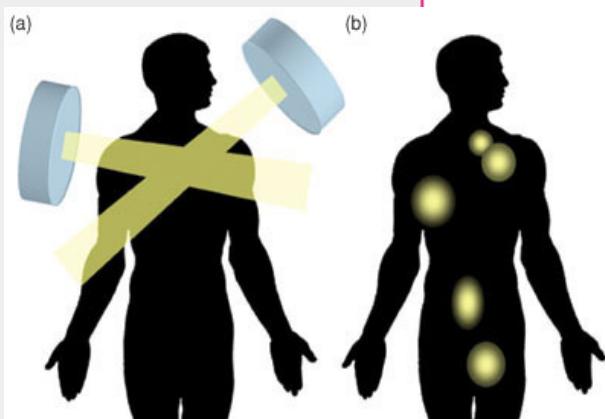
sampai 2 cm, sehingga mampu menembus lapisan kulit lebih dalam dan jaringan kutaneus. Sedangkan lintasan sinar-X (0 – 10 MeV) dan sinar y (0 – 5 MeV) di udara mencapai 100 m dan pada jaringan tubuh sampai 30 cm.

Pada paparan radiasi internal, radiasi yang paling berbahaya adalah dengan tingkat ionisasi yang tinggi pada jaringan tubuh. Ionisasi spesifik (jumlah ion per cm lintasan di udara) partikel alpha (4-7 MeV) sekitar 20.000 – 60.000, sedangkan partikel beta dengan energi 0-7 MeV hanya sekitar 100 – 400 dan sinar-X / sinar gamma tidak lebih dari 500 pasangan ion per cm. Dengan demikian pada paparan radiasi internal, partikel alpha yang paling berbahaya.

Radionuklida yang masuk ke dalam tubuh secara kontinyu meradiasi jaringan dan organ sampai diekskresikan atau dikeluarkan dari tubuh terutama melalui urin dan feses atau sampai menjadi isotop stabil melalui proses peluruhan. Bahan radioaktif ini akan dimetabolisme dan terakumulasi pada organ target dalam tubuh sesuai dengan sifat kimia dan fisiknya. sebagai contoh, iodium akan terakumulasi dalam kelenjar tiroid, stronium dan radium dalam tulang, plutonium dalam paru, dan cesium dalam jaringan lunak tubuh.

Berbagai risiko yang mungkin timbul akibat kontaminasi eksternal (menempelnya bahan radioaktif pada kulit) dan internal, radionuklida pada tubuh dapat dikurangi dengan melakukan proses dekontaminasi sesegera mungkin untuk mengeluarkan radionuklida dari tubuh sebanyak-banyaknya. Proses dekontaminasi terhadap kontaminasi eksternal harus dilakukan sesegera mungkin untuk mencegah terjadinya penyerapan radionuklida melalui kulit ke dalam sistem sirkulasi tubuh. Metode dekontaminasi internal yang dilakukan sangat bergantung pada jenis radionuklidanya.

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap tingkat keparahan kerusakan akibat paparan radiasi antara lain jenis radiasi, dosis dan laju dosis serap,



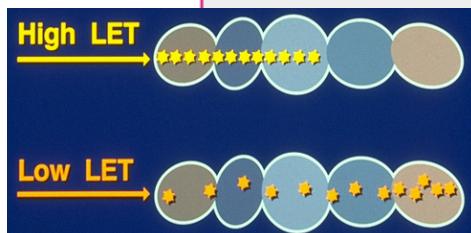
gambar 59.
Ilustrasi paparan radiasi eksternal dan internal (kontaminasi eksternal dan internal)

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

gambar 60.
Perbedaan
tingkat ionisasi
spesifik atau
daya rusak
antara jenis
radiasi LET tinggi
(partikel alpha,
neutron, dan
partikel berat)
dengan radiasi
LET rendah (sinar
gamma, beta,
dan sinar-X)

distribusi paparan radiasi pada tubuh, distribusi waktu paparan radiasi pada tubuh (tunggal/akut atau terbagi/kronik), dan usia. Tubuh berisiko terhadap efek radiasi akibat paparan radiasi baik secara seluruh tubuh maupun hanya pada bagian tubuh tertentu atau lokal. Keduanya mempunyai konsekuensi yang berbeda dengan besaran dosis dan jenis radiasi yang sama. Selain itu, efek radiasi dapat ditinjau dari aspek jenis sel yang terpapar, waktu timbulnya efek radiasi, dan proteksi radiasi yang terkait dengan dosis ambang.

Pada tubuh manusia, secara umum terdapat dua jenis sel yaitu sel genetik dan sel somatik. Bila dilihat dari jenis sel, maka efek radiasi dapat dibedakan atas efek genetik dan efek somatik. Efek genetik adalah efek radiasi yang terjadi berupa mutasi pada sel telur atau sperma yang konsekuensinya terjadi pada keturunan dari individu yang terkena paparan radiasi, sehingga disebut pula sebagai efek pewarisan. Sampai saat ini tidak ditemukan adanya efek pewarisan akibat radiasi pada manusia. Bila efek radiasi diberi oleh individu yang terpapar radiasi maka disebut efek somatik.



Waktu yang dibutuhkan sampai terlihatnya gejala efek somatik sangat bervariasi sehingga dapat dibedakan atas efek segera atau akut dan efek tertunda (late effect). Efek segera adalah efek radiasi yang secara klinik sudah dapat teramati pada individu terpajan dalam waktu beberapa jam, harian sampai mingguan bergantung pada

dosis yang diterima. Efek ini dapat terjadi akibat paparan pada bagian tubuh tertentu atau paparan lokal seperti epilasi (rontoknya rambut), eritema (memerahnya kulit), dan luka bakar, dan juga akibat paparan radiasi seluruh tubuh. Paparan radiasi dosis tinggi (lebih besar dari 1000 mSv) pada seluruh tubuh yang sehat dalam waktu singkat akan menimbulkan efek yang antara lain diawali dengan penurunan jumlah sel darah, mual, muntah, dan diare. Sedangkan efek tertunda merupakan efek radiasi yang baru timbul dalam waktu yang lama (bulanan-tahunan) setelah terkena paparan radiasi, seperti katarak dan kanker.

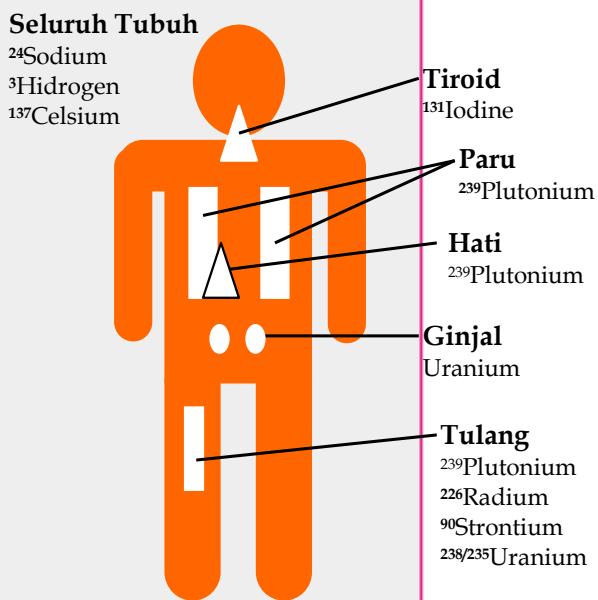
Bila ditinjau dari dosis radiasi (untuk kepentingan proteksi radiasi), efek radiasi dibedakan atas efek deterministik dan efek stokastik. Efek deterministik merupakan sebagai akibat atau konsekuensi dari proses kematian sel akibat paparan radiasi yang mengubah fungsi jaringan terpajan. Efek ini

Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

dapat terjadi sebagai akibat dari paparan radiasi pada seluruh tubuh maupun lokal. Efek deterministik timbul bila dosis yang diterima di atas dosis ambang (*threshold dose*) dan umumnya timbul beberapa saat setelah terpajakan. Efek stokastik adalah efek yang timbul tanpa ada dosis ambang dan akan muncul setelah masa laten yang lama. Serendah apapun dosis radiasi selalu berpotensi adanya risiko atau probabilitas terjadinya efek stokastik yang berupa kerusakan pada sistem biologik baik pada tingkat molekul maupun seluler. Bila sel yang mengalami perubahan ini adalah sel genetik maka sifat sel yang baru tersebut akan diwariskan kepada turunannya sehingga timbul efek genetik atau efek pewarisan. Apabila sel terubah ini adalah sel somatik maka sel-sel tersebut dalam jangka waktu yang relatif lama, ditambah dengan pengaruh dari bahan-bahan yang bersifat toksik lainnya, akan tumbuh dan berkembang menjadi jaringan ganas atau kanker.

Respon dari berbagai jaringan dan organ tubuh terhadap radiasi pengion sangat bervariasi. Selain bergantung pada sifat fisik radiasi juga bergantung pada karakteristik biologi penyusun jaringan/organ tubuh terpajakan. Tingkat sensitivitas dari jaringan penyusun organ berbeda-beda bergantung antara lain pada tingkat proliferasi atau diferensiasi yang akhirnya akan mempengaruhi tingkat sensitivitas dari organ terhadap paparan radiasi. Dengan demikian setiap organ mempunyai dosis ambang yang berbeda dalam menginduksi tejadinya efek deterministik yang ditunjukkan pada Tabel berikut.

Paparan radiasi dosis rendah dapat meningkatkan risiko kanker yang secara statistik dapat dideteksi pada suatu populasi melalui studi epidemiologi, namun tidak secara serta merta terkait dengan paparan individu. Dosis 10 mrem (0,1 mSv) berpotensi menimbulkan risiko kematian akibat kanker pada



gambar 61.
Organ target
beberapa
radionuklida
dalam tubuh

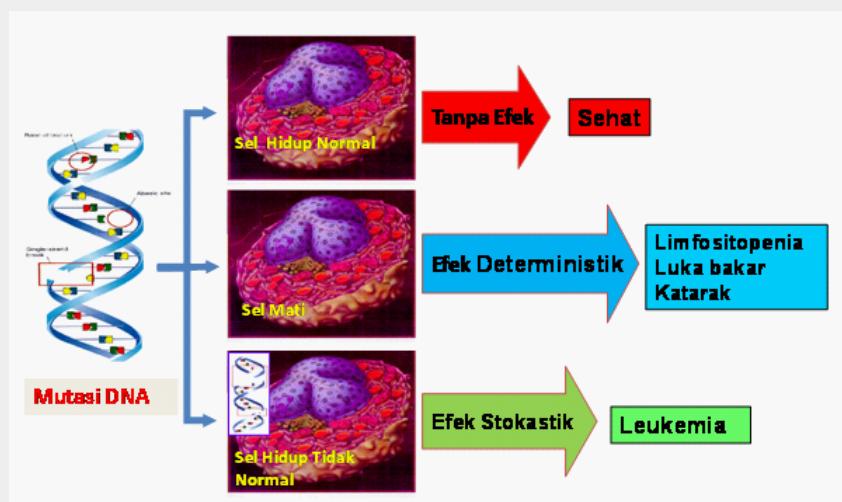
Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

sekitar 1 dalam 1.000.000. Efek pewarisan dan karsinogenik ini diperkirakan terjadi atau terinisiasi oleh radiasi dosis rendah yaitu di bawah 100 mSv. Tidak ada bukti adanya efek genetik atau pewarisan pada manusia akibat paparan radiasi, meskipun pada dosis tinggi.

Kanker yang diinduksi oleh radiasi pengion tidak spesifik artinya tidak dapat dibedakan dengan kanker yang diinduksi oleh faktor lain. Karsinogenesis adalah proses yang terdiri dari banyak tahap, membutuhkan banyak faktor dan waktu yang lama untuk sampai pada tahap dapat dideteksi. Proses ini diawali dengan perubahan pada tingkat molekuler yaitu sekumpulan perubahan pada sejumlah gen yang antara lain terlibat dan berperan dalam sistem sinyal sel, pertumbuhan, siklus sel, differensiasi, dan perbaikan terhadap kerusakan pada DNA. Perubahan pada sejumlah gen ini dapat berupa (1) mutasi gen atau perubahan susunan pada DNA yang menyebabkan terjadinya perubahan fungsi suatu gen seperti protoonkogen menjadi onkogen, dan (2) mutasi atau delesi DNA yang menyebabkan hilangnya fungsi suatu gen seperti gen penekan tumor (*tumor suppressor gene*).

Beberapa jenis kanker yang sudah terbukti timbul akibat paparan radiasi pada populasi tertentu adalah kanker leukemia pada korban bom atom Hiroshima dan Nagasaki, kanker tulang pada pekerja pabrik jam yang

gambar 62.
Efek
deterministik dan
stokastik akibat
paparan radiasi
pengion



Bab 2 Pengantar Biologi Radiasi

menggunakan larutan radium sulfat untuk menandai angka pada jam agar bersinar dalam ruang gelap, kanker paru pada para penambang uranium, dan kanker kulit pada para dokter radiologi yang menggunakan sinar-X tanpa proteksi saat pertama kali pesawat sinar-X diciptakan.

| Target Paparan | Efek | Dosis ambang (mSv) |
|----------------------|-------------------------------|--------------------|
| Seluruh tubuh | Kematian | 2000 |
| | Sindroma sistem hematopoietik | 1000 |
| | Sindroma sistem pencernaan | 5000 |
| | Sindroma sistem syaraf pusat | 20000 |
| Sumsum tulang | Penurunan jumlah sel darah | 500 |
| Kulit | Eritema (kulit memerah) | 200-300 |
| | Epilasi (rontok rambut) | 300 |
| | Pengelupasan (deskumasi) | 500 |
| | Pelepuhan (ulceration) | 1500 |
| | Nekrosis | 25000 - 50000 |
| Lensa mata | Kekeruhan | 650 |
| | Katarak | 2000 - 10000 |
| Testis | Sterilitas sementara | 150 |
| | Sterilitas permanen | 3500 |
| Ovarium | Sterilitas sementara | 650 |
| | Sterilitas permanen | 2500-6000 |

tabel 5 :
Ambang efek
deterministik
akibat paparan
radiasi pengion
pada tubuh



gambar 63.
Efek radiasi pada
kulit yaitu
blister (atas)
ulceration
(tengah), dan
nekrosis (bawah)

3.1 **Reaktor Fusi dan Reaktor Fisi**

Reaksi nuklir, terutama reaksi fisi dan fusi membebaskan energi yang besar dan akan sangat bermanfaat bila energi tersebut dapat digunakan untuk keperluan hidup manusia sehari-hari. Sejak awal abad 19 para ilmuwan telah bekerja keras untuk memanfaatkan energi nuklir, yaitu energi yang berasal dari inti atom atau nuklir, dalam sebuah reaktor. Reaktor fusi masih belum dapat diwujudkan secara komersial karena beberapa kendala teknis dalam menjaga kontinuitas dan stabilitas reaksi fusi.

Sementara itu reaktor fisi telah berkembang lebih dahulu dan sampai pada tahap operasi komersial. Beberapa negara sudah bergantung penuh pada reaktor fisi untuk memenuhi kebutuhan listriknya. Perkembangan teknologi reaktor fisi maju cukup pesat, dan bahkan telah menjadi komoditas strategis. Sayangnya perkembangan teknologi reaktor fisi selanjutnya sedikit terhambat karena adanya campur tangan politisi yang bermaksud memanfaatkan nilai-nilai strategisnya dalam kancah perpolitikan.

Bagian berikut ini akan membahas tentang pemanfaatan energi nuklir dari reaksi fusi dan fisi dalam sebuah reaktor nuklir, yaitu dalam reaktor fusi dan reaktor fisi.

Reaktor Fusi

Reaktor fusi pertama kali diwujudkan di Uni Soviet pada tahun 1950. Reaktor fusi ini dinamai reaktor Tokamak singkatan dari Toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami yang artinya lebih kurang ruang toroidal dengan koil magnetik. Reaktor fusi Tokamak ditemukan pada tahun 1950 oleh ilmuwan Soviet Igor Yevgenyevich Tamm dan Andrei Sakharov. Penemuan mereka didasari oleh ide dari Oleg Lavrentyev. Baru pada tahun 1968 reaktor ini dinyatakan berhasil mendemonstrasikan terjadinya reaksi fusi di dalamnya.

Reaktor Tokamak bekerja berdasarkan reaksi fusi antara deuterium dan tritium (reaksi D-T) yang menghasilkan helium, neutron dan energi. Temperatur reaksi fusi dapat mencapai 100 juta derajat celcius. Karena

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

tingginya temperatur reaksi fusi, maka hingga sampai saat ini belum ada material yang bisa dijadikan sebagai bejana untuk menampung reaksi fusi. Oleh karena itu, dalam Tokamak digunakan medan magnet untuk menyangga plasma campuran bahan bakar deuterium dan tritium yang berfusi. Skema cara kerja reaktor Tokamak ditunjukkan pada gambar sketsa berikut ini.

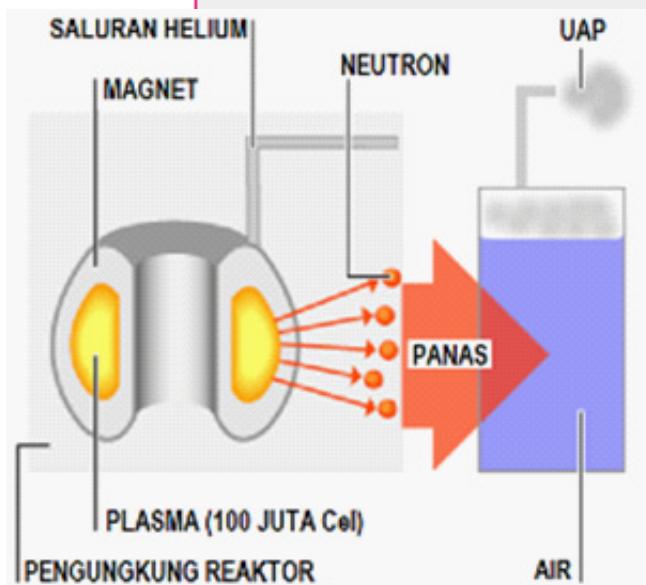
Bahan bakar dari reaktor Tokamak adalah deuterium dan tritium. Deuterium adalah bahan yang ada dalam air laut dengan jumlah yang melimpah, tetapi tritium tidak terdapat di alam. Tritium harus dibuat di dalam reaktor fusi dari bahan lithium yang ada di alam. Secara lengkap reaksi nuklir yang ada di dalam reaktor Tokamak adalah sebagai berikut.



Reaksi nuklir pertama menunjukkan bahwa tritium (${}_1H^3$) dibuat dari lithium (${}_3Li^6$) yang dibombardir dengan neutron (${}_0n^1$). Selanjutnya, tritium (${}_1H^3$) yang diperoleh direaksikan dengan deuterium (${}_1H^2$) untuk berfusi menjadi helium (${}_2He^4$) dan menghasilkan neutron dengan energi kinetik neutron 14,1 MeV. Energi neutron ini dapat diubah menjadi energi panas untuk membangkitkan uap, dan kemudian uapnya dipakai untuk memutar generator turbin yang menghasilkan energi listrik.

Struktur dan konstruksi reaktor Tokamak ditunjukkan dengan ilustrasi teknis pada gambar 65.

Sejak pusat penelitian Kurchatov di Rusia mengumumkan keberhasilan mereka mewujudkan reaksi fusi dalam sebuah reaktor Tokamak di tahun 1968, hingga sampai saat ini belum ada reaktor fusi yang beroperasi secara komersial. Semua reaktor fusi di dunia masih dalam tahap eksperimental, bahkan diperkirakan reaktor fusi demonstrasi (*demo plant*) baru akan terwujud setelah tahun 2040. Walaupun demikian, keberhasilan ilmuwan Rusia dalam mewujudkan reaksi fusi dalam sebuah Tokamak telah mendorong negara maju lainnya untuk melakukan litbang reaktor fusi, diantaranya di Inggris dibangun fasilitas JET (*Joint European Torus*), di Jerman TEXTOR (*Tokamak EXperiment for Technology Oriented Research*), di Jepang JT-60 (*Japan Torus-60*) dan di Amerika TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*).



gambar 64.
Sketsa reaktor
fusi Tokamak

ilmuan dalam program litbang ITER.

Hampir semua reaktor fusi yang ada pada saat ini, dan reaktor fusi yang sedang dirancang untuk dibangun di Perancis dalam proyek ITER yang ambisius adalah menggunakan tipe reaktor Tokamak. Persoalan utama dari reaktor fusi adalah mewujudkan reaksi fusi secara terus menerus (kontinu) dengan stabil. Kontinuitas dan stabilitas reaksi fusi sulit dicapai karena kondisi pada saat reaksi fusi berlangsung sangat mudah berubah. Kesulitan ini menyebabkan reaktor Tokamak hanya dapat beroperasi beberapa saat, setelah itu reaktor harus berhenti karena reaksi fusi terhenti, dan selanjutnya diperlukan persiapan secukupnya untuk pengisian bahan bakar deuterium dan tritium ke dalam ruang inti/teras reaktor.

Bahan Bakar Reaktor Fusi

Reaksi fusi D-T (deuterium-tritium) dalam sebuah reaktor nuklir Tokamak membutuhkan deuterium dan tritium. Tritium dibuat dari lithium dalam reaktor fusi, dengan demikian bahan bakar reaktor fusi adalah deuterium

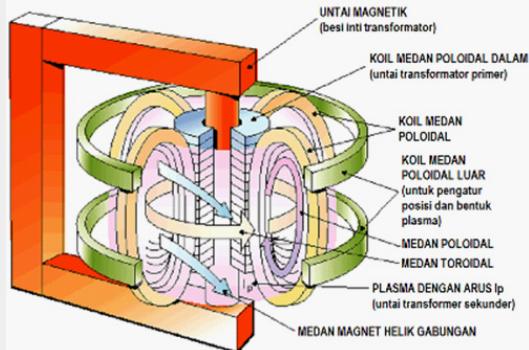
dan tritium.

Litbang reaktor fusi terus berkembang, saat ini beberapa negara (China, Uni Eropa, Switzerland, Jepang, Korea Selatan, Federasi Rusia, USA) bergabung untuk melakukan litbang reaktor fusi dan merencanakan membangun reaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) di Perancis pada tahun 2016. Desain ITER ditunjukkan pada gambar berikut ini.

Gambar 67 memperlihatkan konsep desain suatu pembangkit listrik tenaga nuklir fusi berdasarkan prinsip kerja reaktor Tokamak yang dibuat oleh

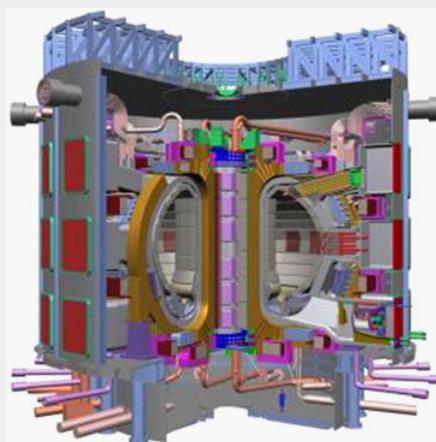
Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

dan lithium. Keberadaan deuterium dalam air laut sangat melimpah, dan dapat digunakan untuk pemakaian selama ratusan ribu tahun, bahkan mungkin lebih dari sejuta tahun. Lithium sebagai bahan baku pembuat tritium cukup banyak terdapat di lapisan bumi, kuantitas cadangan lithium akan mampu memasok reaktor fusi selama beberapa ribu tahun. Tetapi tritium juga dapat dibuat dalam suatu reaktor nuklir, teknik ini akan sangat bermanfaat apabila cadangan lithium telah menipis.



Reaksi fusi dalam reaktor Tokamak menghasilkan limbah radioaktif tetapi dengan umur paruh yang pendek. Tritium yang dihasilkan dari sisa-sisa reaksi fusi adalah isotop yang memancarkan radiasi (radioisotop) dengan umur paruh 12,36 hari. Neutron yang dipancarkan dari reaksi fusi juga dapat membuat bahan struktur reaktor yang ditumbuknya menjadi radioaktif. Radioisotop yang dihasilkan karena aktivasi neutron ini akan mempunyai umur paruh tidak lebih dari seratus tahun. Limbah radioaktif yang dihasilkan dari dalam reaktor fusi relatif lebih rendah radioaktivitasnya dari pada limbah yang dihasilkan dari reaktor fisi.

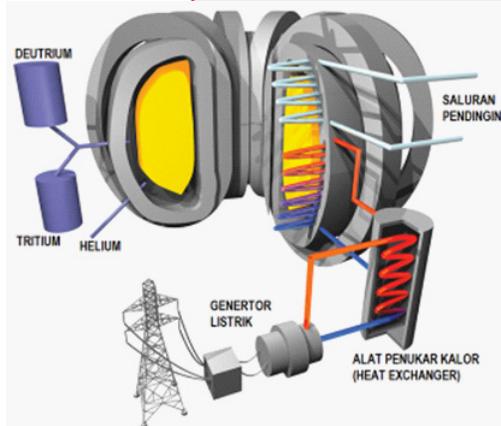
gambar 65.
Struktur
konstruksi
reaktor Tokamak



gambar 66.
Desain ITER

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

gambar 67. Pembangkit listrik tenaga nuklir fusi



Dari jumlah cadangan atau ketersediaan bahan bakar reaktor fusi di alam yang sangat melimpah, maka reaktor fusi merupakan pembangkit energi yang ideal yang akan dapat memasok kebutuhan energi bagi umat manusia dimasa mendatang dalam jangka waktu yang lama dan ramah lingkungan.

Berbagai skenario daur atau siklus bahan bakar reaktor fusi dapat dikembangkan, tetapi pengembangan ini masih belum dilakukan karena para ilmuwan masih mengalami kendala teknis dalam mewujudkan reaktor fusi kontinu yang memadai untuk memasok kebutuhan energi sehari-hari.

Reaktor Fisi

Prinsip Pengendalian Reaksi Fisi

Di dalam reaktor nuklir, reaksi fisi diharapkan akan berlangsung secara kontinu dan terkendali. Yang dimaksud dengan terkendali dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan dengan mantap dan stabil

sesuai dengan kebutuhan energi. Sesungguhnya, mengupayakan agar reaksi fisi terjadi secara terus menerus dan berkelanjutan tidaklah mudah. Terutama jika reaksi fisi kontinu tersebut harus terjadi dalam uranium alam, yang mengandung bahan fisil U-235 hanya 0,7%. Ini berarti dalam uranium alam dengan jumlah atom 1000 buah, maka hanya akan terdapat 7 buah isotop U-235 dan sisanya 993 buah atom adalah isotop U-238. Gambar 68 mendeskripsikan bagaimana keberlanjutan reaksi fisi berantai mengalami hambatan dengan adanya isotop U-238 yang menangkap neutron.

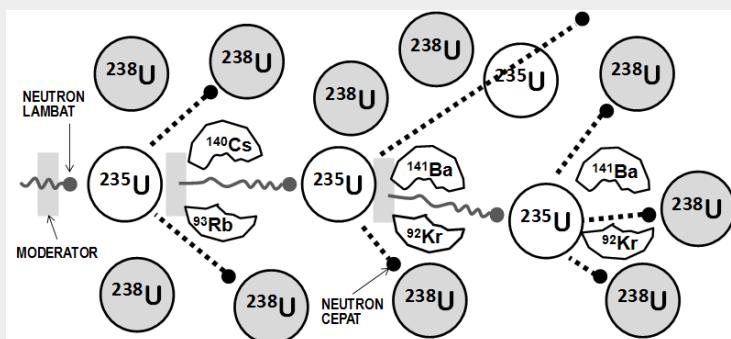
Tidak semua neutron yang dihasilkan dari suatu reaksi fisi dapat mencapai nuklida U-235 dan menimbulkan reaksi fisi berikutnya. Sebagian besar neutron akan tertangkap U-238 sebelum mencapai nuklida U-235. Neutron mungkin dapat saja mencapai nuklida U-235, tetapi karena tidak melewati proses moderasi, kecepatan/energinya masih tinggi, maka tampang lintang fisinya kecil, sehingga probabilitas tumbukan akan menghasilkan reaksi fisi juga kecil dan bahkan mungkin sekali tidak menimbulkan reaksi fisi. Adalah sangat sulit untuk membuat reaksi fisi berlanjut secara kontinu dalam uranium alam.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Cara yang digunakan dalam PLTN tipe CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*) untuk mengendalikan reaksi fisi kontinu dalam uranium alam adalah dengan memoderasi neutron hingga kecepatannya sangat rendah dan dengan demikian tampang lintang fisi U-235 mempunyai nilai yang jauh lebih tinggi dari tampang lintang tangkapan U-238. Dengan demikian hampir semua neutron yang ada tidak akan mudah tertangkap oleh U-238, tetapi menunggu kesempatan untuk bertemu dengan U-235 agar dapat bertumbuhan dan menghasilkan reaksi fisi.

Metode lain untuk mengendalikan reaksi fisi kontinu adalah dengan menaikkan kandungan U-235 dalam uranium alam dan memperlambat kecepatan/energi neutron pada suatu tingkat kecepatan yang sesuai. Dalam teras reaktor nuklir PLTN tipe PWR, kandungan isotop U-235 diperkaya 3% – 5% dan sisanya 95% adalah U-238. Struktur geometri dan komposisi bahan bakar serta moderator diatur sedemikian rupa sehingga reaksi fisi berantai dapat berlanjut secara kontinu.

Setelah persoalan menjaga kontinuitas reaksi fisi dalam teras reaktor nuklir terselesaikan, persoalan berikutnya adalah mengatur energi dari reaksi fisi kontinu. Karena setiap U-235 yang berfisi menghasilkan neutron lebih dari satu (2 hingga 3 neutron), maka populasi neutron akan naik dari waktu ke waktu, dan populasi neutron tersebut akan menyebabkan timbulnya reaksi fisi karena kondisi teras sudah disesuaikan untuk keberlangsungan reaksi fisi secara kontinu. Dengan demikian jumlah reaksi fisi akan bertambah bersamaan dengan bertambahnya populasi neutron. Bertambahnya jumlah reaksi fisi akan menaikkan produksi energi dalam teras reaktor, dan kondisi ini harus bisa dikendalikan, agar tidak terjadi kenaikan produksi energi yang liar.



gambar 68.
Keberlanjutan
reaksi fisi
berantai dalam
uranium alam

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Jumlah neutron dalam teras reaktor akan sebanding dengan jumlah reaksi fisi, dan jumlah reaksi fisi sebanding dengan energi yang dihasilkan dalam teras reaktor nuklir. Jadi dengan mengendalikan populasi neutron dalam teras reaktor nuklir, maka hal itu sama saja dengan mengendalikan energi atau daya reaktor. Untuk mengendalikan populasi neutron dalam teras reaktor agar jumlahnya sesuai dengan daya yang diinginkan, dapat digunakan material yang mempunyai daya serap neutron tinggi, atau material yang mempunyai tumpang lintang serapan tinggi.

Dengan menempatkan bahan penyerap neutron di sekitar bahan bakar uranium, maka sebagian neutron akan terserap dan populasi neutron akan turun. Jumlah penyerapan neutron dari dalam teras dapat dilakukan dengan meningkatkan volume pemasukan penyerap neutron dalam teras reaktor. Biasanya bahan penyerap neutron adalah perak, indium atau cadmium dalam bentuk padat, sehingga dengan memasukkan atau mengeluarkan bahan penyerap ke dan dari dalam teras daya reaktor dapat dikendalikan.

Konstruksi Reaktor Fisi

Seperti telah dibahas, bahwa dalam reaktor nuklir terdapat empat buah komponen utama, yaitu: (1) uranium sebagai bahan bakar, (2) neutron dengan kecepatan rendah (neutron termal), (3) moderator dan (4) bahan pengendali. Komponen utama tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

Bahan bakar reaktor nuklir dalam PLTN yang banyak beroperasi pada saat ini adalah uranium. Untuk bahan bakar reaktor nuklir, uranium biasanya diperkaya hingga mencapai tingkat pengayaan lebih kurang 20 % (pada reaktor riset), artinya dalam uranium akan terdapat isotop U-235 sebanyak 20% dan sisanya 80% adalah isotop U-238. Untuk PLTN tipe PWR pengayaan bahan bakar uraniumnya maksimum hanya 5%.

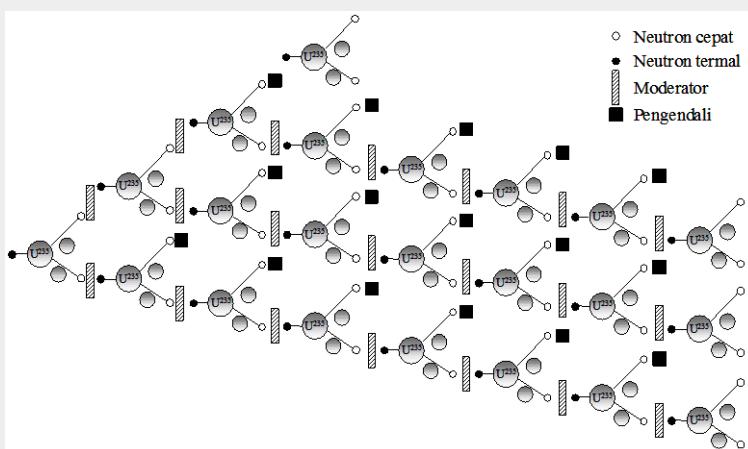
Pada kebanyakan reaktor, logam uranium dicetak dalam bentuk silinder dengan diameter sekitar satu sentimeter dan tinggi satu sentimeter, seperti pil. "Pil-pil" ini kemudian dimasukkan dalam kelongsong berbentuk pipa panjang (panjangnya sekitar 4 meter, sesuai dengan tipe reaktor) yang terbuat dari logam paduan zirkonium (*zirkalloy*). Kedua ujung kelongsong

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

ditutup dan di dalam kelongsong diisi gas helium. Satu batang kelongsong yang telah berisi pil bahan bakar disebut batang bahan bakar atau elemen bahan bakar. Di dalam reaktor nuklir terdapat ribuan bahan bakar dalam bentuk batang seperti gambar 73. Jumlah batang bahan bakar akan sangat bergantung pada daya reaktor. Jika reaksi fisi kontinu berlangsung dalam batang bahan bakar, maka batang bahan bakar tersebut menjadi panas.

Partikel neutron banyak terdapat di sekitar kita. Sesuai dengan teori kinetika gas, partikel disekitar kita akan bergerak zig-zag (kiri-kanan atau atas-bawah) dengan kecepatan gerak sebanding dengan temperatur lingkungannya. Jika temperatur semakin tinggi maka kecepatan gerak partikel juga semakin cepat. Demikian pula dengan partikel neutron. Neutron yang berada pada temperatur lebih kurang 20°C akan melakukan gerak zig-zag dengan kecepatan 2200 m/det (energi kinetiknya 0.025 eV). Neutron yang bergerak dengan kecepatan itu disebut neutron termal. Neutron termal termasuk dalam golongan neutron berkecepatan rendah. Oleh karena temperatur ruang di sekitar kita lebih kurang mendekati 20°C, maka di sekitar kita akan terdapat neutron termal, hanya saja jumlahnya sangat terbatas.

Untuk memicu reaksi fisi dalam reaktor nuklir tidak cukup jika digunakan neutron termal alam yang terbatas jumlahnya. Biasanya untuk maksud ini digunakan sumber neutron termal buatan dengan kuantitas neutron termal yang cukup memadai. Jumlah neutron termal pada saat reaktor beroperasi meningkat hingga mencapai 10^{11} neutron/cm².det, bahkan setelah reaktor



gambar 69.
Pengendalian
reaksi fisi
berantai

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

dipadamkan, populasi neutron di reaktor cukup tinggi bila dibandingkan dengan populasi neutron di sekitar kita. Dengan demikian untuk memicu reaksi fisi berantai yang kedua kalinya di dalam reaktor nuklir biasanya tidak lagi dibutuhkan sumber neutron buatan seperti pada saat pertama kali memicu reaksi fisi berantai.

Bahan moderator yang banyak digunakan pada reaktor nuklir adalah air, grafit (blok karbon) dan air berat (D_2O). Bahan moderator harus dapat meredam kecepatan atau menurunkan energi neutron cepat hasil reaksi fisi (energi kinetiknya 4,9 MeV) agar menjadi neutron termal dengan energi kinetik 0,025 eV, dan tidak boleh mempunyai sifat menyerap neutron, kecuali dalam jumlah tertentu yang relatif kecil. Bahan moderator neutron harus mempunyai tampang lintang hamburan tak-elastis yang besar, sehingga energi kinetik neutron dapat dengan cepat diturunkan. Penurunan energi kinetik/kecepatan gerak neutron bertujuan untuk menyesuaikan kecepatan neutron dengan tampang lintang fisi dari U-235.

Bahan pengendali yang umum digunakan adalah perak (Ag), indium (In) dan cadmium (Cd). Unsur ini terkenal sangat kuat dalam menyerap neutron. Pada kenyataan di reaktor, logam cadmium dibentuk dalam bentuk batang yang dapat digerakkan masuk ke dan keluar dari dalam teras reaktor. Karena itu komponen pengendali ini sering disebut sebagai "batang kendali".

Selain batang kendali, pengendali reaktor dapat berbentuk cairan, yaitu asam borat juga digunakan dalam PLTN tipe PWR. Asam borat adalah cairan yang mempunyai tampang lintang serapan neutron yang cukup tinggi, sehingga kalau cairan ini dimasukkan ke dalam air pendingin reaktor maka jumlah populasi neutron akan turun cukup dratis. Ilustrasi yang mendeskripsikan struktur dan konstruksi reaktor nuklir fisi dapat dilihat pada gambar 70.

Ilustrasi sederhana tentang konstruksi reaktor nuklir yang diperlihatkan dalam gambar 70 adalah bersifat umum dan berupa gambaran konseptual yang sederhana. Bentuk nyata dari reaktor yang beroperasi pada saat ini jauh lebih canggih dari apa yang diperlihatkan dalam gambar di atas. Walaupun demikian gambar ini sangat tepat untuk menggambarkan konsep struktur konstruksi reaktor nuklir. Dalam gambar tersebut, diperlihatkan suatu tempat di mana bahan bakar berkumpul, dan lokasi tersebut disebut sebagai inti reaktor atau teras reaktor (*reactor core*).

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Jenis-jenis reaktor fisi, yaitu reaktor riset dan reaktor daya.

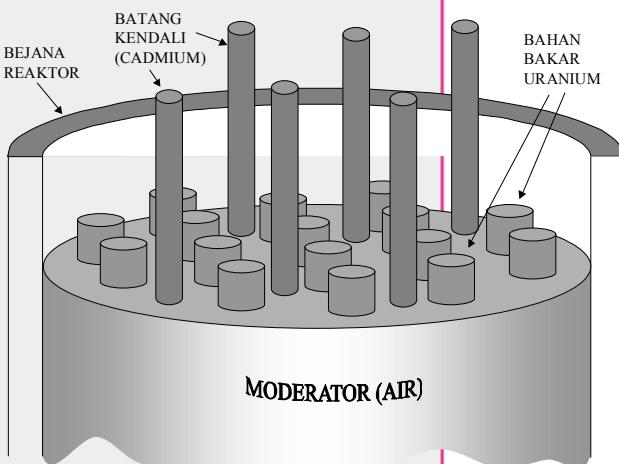
Reaktor Riset

Reaksi fisi adalah fenomena penting dalam reaktor nuklir. Dari reaksi fisi U-235 dihasilkan energi 202 MeV dan lebih kurang 3 buah neutron. Perbedaan utama dari reaktor riset dan reaktor daya adalah pada pemanfaatan neutron dari hasil reaksi fisi yang terjadi di dalamnya. Dalam reaktor riset, energi hasil reaksi fisi tidak dimanfaatkan tetapi dibuang ke lingkungan.

Dalam perancangan reaktor riset, efisiensi termodinamika sistem tidak menjadi fokus utama, sehingga temperatur pendingin tidak perlu tinggi, cukup pada rentang 40 – 50°C. Fokus utama perancangan reaktor riset adalah kuantitas dan kualitas partikel neutron. Neutron digunakan untuk berbagai manfaat baik yang bersifat riset ilmu pengetahuan maupun untuk tujuan komersial. Pemanfaatan neutron antara lain adalah untuk produksi radiosiotop yang dapat dimanfaatkan di bidang kesehatan, pertanian dan industri, analisis material melalui teknik Analisis Pengaktifan Neutron (APN), spektrometer neutron, difraktometer neutron, silicon doping (bahan semikonduktor), riset pengembangan material baru dan lain sebagainya. Reaktor riset kebanyakan berbentuk kolam dan bertekanan rendah (1 atm).

Gambar 71 menggambarkan sketsa sederhana reaktor G.A. Siwabessy yang ada di Serpong, Tangerang. Panas yang diambil oleh pendingin air (berlaku juga sebagai moderator) dibuang ke lingkungan melalui menara pendingin. Pada reaktor ini terdapat tabung berkas neutron (*neutron beam tube*) untuk menyalurkan partikel neutron keluar dari teras sehingga mudah untuk dimanfaatkan. Reaktor riset di Yogyakarta dan Bandung sangat identik dengan reaktor G.A. Siwabessy. Bahan bakar reaktor G.A. Siwabessy berbentuk lempeng/plat, sedangkan reaktor Kartini di Yogyakarta dan

gambar 70.
Struktur dan
konstruksi
reaktor nuklir fisi



Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

TRIGA 2000 di Bandung berbentuk silinder (batang).

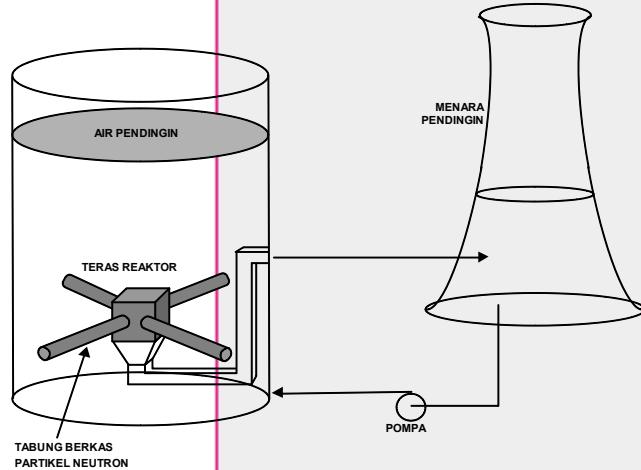
a. Reaktor Triga 2000 Bandung

Nama TRIGA berasal dari singkatan "*Training, Research, Isotop production, by General Atomic*" menunjukkan fungsi reaktor sebagai reaktor penelitian. Reaktor Triga Bandung mulai dibangun pada tanggal 1 Januari 1961 dan mencapai kekritisan pada 16 Oktober 1964 dan secara resmi mulai dioperasikan pada tanggal 20 Februari 1965 dengan daya sebesar 259 kW. Pada tahun 1974, daya reaktor ditingkatkan menjadi 1 MW dan kemudian di upgrade lagi menjadi 2 MW pada 24 Juni 2000. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium diperkaya yang dicampur secara homogen dengan zirkonium hidrida ($UZrH_2$), air (H_2O) sebagai moderator dan pendingin, reflektor grafit dan H_2O sebanyak 4 buah dan batang kendali B_4C sebanyak 5 buah.

b. Reaktor Kartini Yogyakarta

Reaktor Kartini di Yogyakarta adalah reaktor TRIGA kedua yang dibangun di Indonesia. Pembangunannya dimulai pada tanggal 1 April 1975 dan mencapai kekritisan pada 25 Januari 1979. Reaktor yang dioperasikan pada daya 100 kW ini menggunakan bahan bakar, moderator, pendingin dan reflektor yang sama dengan reaktor Bandung, tetapi jumlah batang kendali hanya 3 buah.

gambar 71.
Struktur dan
konstruksi
reaktor riset



c. Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy Serpong

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG- GAS) mulai dibangun di Kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Serpong pada tanggal 1 Januari 1983 dan mencapai kekritisan pada tanggal 29 Juli 1987. Reaktor ini dapat dioperasikan pada daya maksimal 30 MW. Bahan bakar yang digunakan adalah $U_3Si_2Al_x$, moderator dan pendingin air ringan, reflector Be dan H_2O , batang kendali Ag, In, Cd (8 buah). Pertahanan berlapis RSG-GAS dimulai dari desain elemen bakar

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

reaktor, sistem pendingin reaktor dan pengungkung reaktor yang dilengkapi dengan sistem ventilasi. Penggunaan sistem redundansi pada seluruh sistem keselamatan bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem keselamatan sehingga resiko kegagalan dapat diperkecil untuk melindungi keselamatan pekerja, masyarakat dan lingkungan.

Reaktor Daya

Reaktor daya (*power reactor*) adalah reaktor nuklir yang memanfaatkan energi hasil reaksi fisi untuk pembangkitan daya (listrik). Energi reaksi sebesar 202 MeV biasanya berbentuk energi kinetik fragmen fisi, dan gerakan fragmen fisi ini akan bertumbukan dengan inti di sekitarnya sehingga timbul panas. Kemudian energi termal dari reaksi fisi tersebut akan dimanfaatkan untuk berbagai kegunaan, misalnya memutar generator listrik, menggerakkan baling-baling penggerak kapal, memanaskan air yang dibutuhkan selama musim dingin atau untuk menyuling air laut (membuat air minum dari air laut yang kadar garamnya tinggi). Secara umum prinsip kerja dari reaktor daya dapat digambarkan dengan ilustrasi pada gambar berikut ini.

Sebagaimana digambarkan pada ilustrasi di atas, energi panas dari reaktor daya dibangkitkan pada teras reaktor karena di dalam terjadi reaksi antara inti uranium dengan neutron. Panas yang terjadi kemudian akan ditransfer oleh air pendingin ke pembangkit uap. Pada reaktor jenis ini, meskipun suhu air pendingin di dalam tabung reaktor sangat tinggi tidak akan terjadi proses penguapan karena diberikan tekanan yang sangat tinggi (+/- 150 atm) sedangkan di pembangkit uap akan terjadi penguapan karena tekanannya rendah (1 atm). Uap air yang terjadi kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang di kapal dengan generator sehingga dihasilkan listrik.

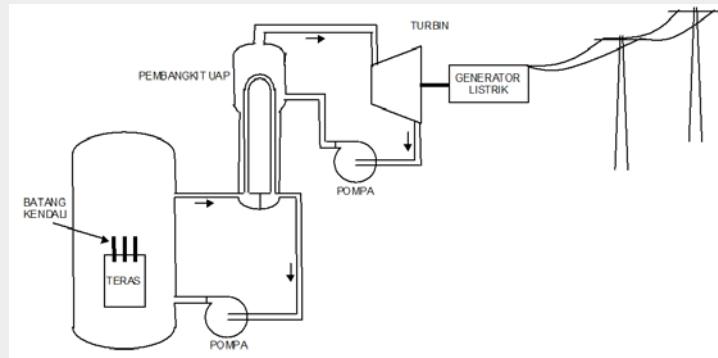
Reaktor daya dapat menghasilkan daya listrik berkisar antara 600 – 1600 MWe. Jika daya listrik yang dihasilkan adalah sebesar 600 MW, maka daya termal yang harus dibangkitkan dalam teras reaktor lebih kurang tiga kalinya, yaitu 1800 MWe termal. Sebagai contoh PLTN yang sedang dibangun di Finlandia akan mempunyai kemampuan membangkitkan listrik hingga 1600 MWe.

Berdasarkan jenis pendingin yang digunakan, reaktor daya dapat digolongkan menjadi reaktor berpendingin air, reaktor berpendingin gas, reaktor berpendingin logam cair, dan reaktor berpendingin garam cair. Pada

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

gambar 72.
Prinsip kerja
reaktor
daya untuk
pembangkit
listrik

saat ini reaktor berpendingin air sangat populer dan banyak beroperasi di dunia. Dua tipe reaktor pendingin air yang sangat populer adalah reaktor air tekan dan reaktor air didih.

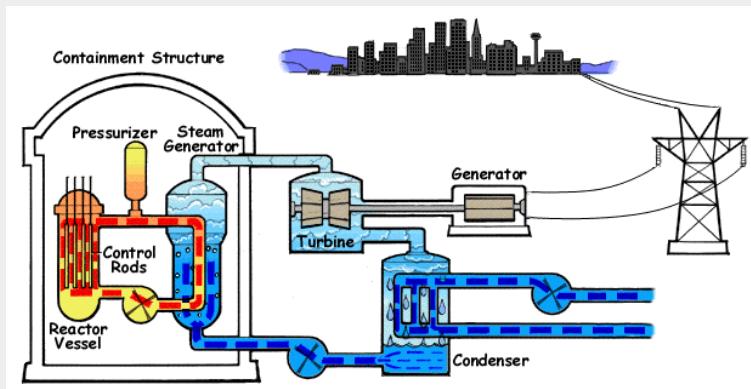


a. Reaktor Air Tekan (Pressurized Water Reactor, PWR)

Pada kondisi tekanan rendah, misalnya satu atmosfer, air akan mendidih pada temperatur lebih-kurang 100°C . Temperatur serendah ini secara termodinamika tidak efisien untuk dimanfaatkan sebagai media kerja suatu sistem pembangkit daya listrik. Untuk meningkatkan efisiensi termodinamika, temperatur air harus dinaikkan setinggi kira-kira 300°C . Jika tekanan air satu atmosfer, maka air bertemperatur 300°C akan mendidih hebat. Untuk mencegah pendidihan maka air di dalam bejana reaktor ditekan dengan tekanan yang cukup tinggi untuk menjaga agar air di dalamnya tidak mendidih. Tipe reaktor seperti ini terkenal dengan sebutan PWR (Pressurized Water Reactor : Reaktor Air Tekan).

Prinsip kerja reaktor nuklir tipe PWR diperlihatkan pada Gambar 73. Air yang bersirkulasi dari bejana reaktor menuju pembangkit uap dan kemudian dipompakan kembali ke bejana reaktor adalah air bertekanan tinggi dan tidak mendidih. Jalur ini disebut "untai primer". Sedangkan jalur air-uap dari pembangkit uap, kemudian menuju turbin dan selanjutnya dipompakan kembali ke pembangkit uap disebut "untai sekunder".

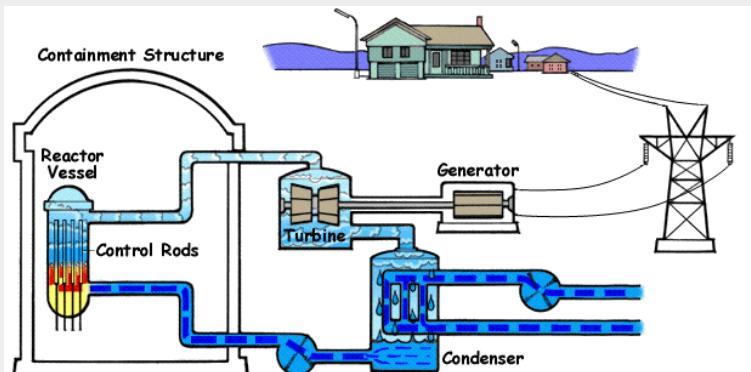
Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi



gambar 73.
Konsep
konstruksi
reaktor air tekan
(PWR)

b. Reaktor Air Didih (Boiling Water Reactor, BWR)

Pada reaktor PLTN tipe air didih, air digunakan sebagai moderator dan pendingin. Pada reaktor tipe ini, untai sekunder dihilangkan, dan air dalam untai primer dibiarkan mendidih. Disain reaktor seperti ini akan meningkatkan efisiensi termal, walaupun dalam mendisainnya harus lebih berhati-hati karena tingkat risikonya lebih tinggi jika terdapat air mendidih yang bocor. Air sebagai pendingin akan mengambil panas dari teras reaktor hingga mendidih dan menjadi uap. Uap yang dihasilkan langsung di transfer ke turbin untuk menggerakkan generator listrik. Jelas dalam reaktor tipe ini tidak diperlukan pembangkit uap, karena proses penguapan langsung terjadi pada teras reaktor. Dalam bahasa Inggris reaktor didih terkenal



gambar 74.
Konsep
konstruksi
reaktor air didih
(BWR)

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

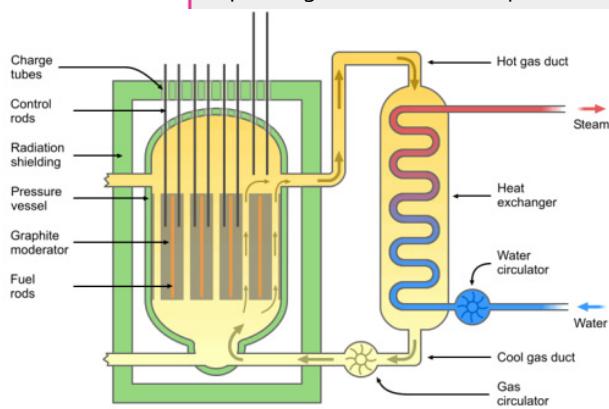
gambar 75.
Konsep struktur
dan konstruksi
reaktor
pendingin gas

dengan nama BWR (*Boiling Water Reactor*). Gambar 74 memberikan ilustrasi tentang prinsip kerja reaktor tipe BWR.

c. Reaktor Pendingin Gas (*Gas-Cooled Reactor, GCR*)

Dari sudut pandang teori termodinamika, semakin tinggi temperatur pendingin maka akan diperoleh efisiensi yang tinggi pula. Dalam hal kemampuan pencapaian temperatur tinggi, air mempunyai keterbatasan.

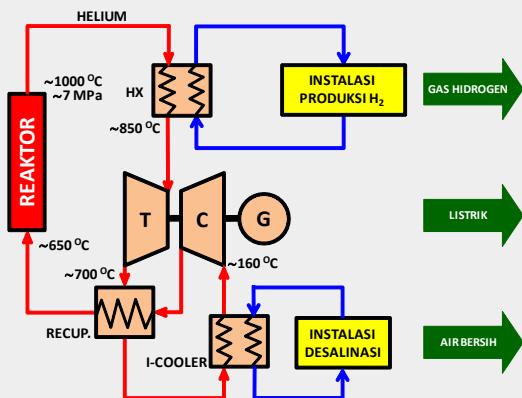
Temperatur air akan sangat sulit untuk dapat ditingkatkan hingga melebihi 400°C . Untuk mengatasi keterbatasan ini, para ilmuwan melirik pada gas sebagai pendingin, dengan demikian temperatur pendingin dapat ditingkatkan hingga mencapai 1000°C . Gas yang digunakan biasanya helium (He) atau karbodioksida (CO_2).



Tetapi gas adalah bukan bahan moderator yang baik, jadi kontinuitas reaksi fisi jadi terancam. Untuk mengatasi masalah ini digunakan moderator grafit (blok karbon) yang disusun sedemikian rupa sehingga reaksi fisi tetap berlangsung secara kontinu. Konsep konstruksi reaktor berpendingin gas ditunjukkan pada gambar 75.

Oleh karena kemampuan pendingin reaktor yang dapat mencapai temperatur tinggi, maka terbuka kemungkinan untuk memanfaatkan reaktor berpendingin gas sebagai sumber pemasok energi termal untuk produksi hidrogen, pencairan dan gasifikasi batu bara, pengambilan minyak tersier dan desalinasi air laut. Jepang dan Perancis bahkan membuat konsep reaktor kogenerasi yang dipergunakan untuk produksi hidrogen, pembangkit listrik dan produksi air bersih (desalinasi) secara bersamaan. Konsep tersebut ditunjukkan pada gambar 75.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi



gambar 76. Konsep reaktor kogenerasi

Rencana Pembangunan PLTN di Indonesia

Ide untuk membangun PLTN di Indonesia didasari oleh pertimbangan bahwa sumber energi fosil yang selama ini menjadi penopang utama dalam pembangkitan listrik di Indonesia mulai menipis. Peningkatan kebutuhan listrik dari berbagai sektor mengalami peningkatan rata-rata yaitu sekitar 9% per tahun akan sulit apabila hanya mengandalkan pada bahan fosil. Tuntutan pemenuhan kebutuhan listrik dan kualitas lingkungan yang bersih juga menjadi persyaratan yang harus dipenuhi dalam pembangkitan listrik di masa mendatang.

Pada awal tahun 1970-an perencanaan secara serius pembangunan PLTN telah dilakukan dengan pembentukan Komisi Persiapan Pembangunan PLTN (KP2PLTN). Tugas komisi ini adalah melakukan kajian tentang hal-hal yang terkait dengan kemungkinan pembangunan PLTN di Indonesia. Hasil kerja komisi diantaranya adalah menetapkan sekitar 14 lokasi yang diusulkan kepada pemerintah untuk dilakukan studi lebih lanjut sebagai calon tapak PLTN. Usulan tersebut kemudian ditindaklanjuti dengan kegiatan studi kelayakan oleh Badan Tenaga Atom Nasional (sekarang menjadi Badan Tenaga Nuklir Nasional) bekerja sama dengan pemerintah Italia, Amerika, Perancis dan *International Atomic Agency* (IAEA), yang dilakukan hingga tahun 1986.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Kegiatan studi tentang kelayakan introduksi PLTN di Indonesia, dari berbagai aspek dilaksanakan pada awal tahun 1991 hingga 1996 bekerja sama dengan konsultan New. JEC. Inc dari Jepang. Secara keseluruhan pemilihan lokasi PLTN akan ditinjau dari berbagai segi, yaitu dari hasil penilaian kelistrikan, prasarana transportasi, tersedianya air, kegempaan, geologi, hidrologi, kependudukan, lingkungan dan lain-lain. Hasil studi adalah berupa rekomendasi lokasi terbaik untuk PLTN, yaitu Ujung Lemah Abang, Ujung Grenggengan dan Ujung Watu.

Ketiga lokasi tersebut berada di wilayah Kabupaten Jepara. Apabila seluruh kegiatan dari mulai persiapan dan pembangunan dapat dilaksanakan dengan lancar maka pada tahun 2005 PLTN unit pertama sudah mulai beroperasi. Akan tetapi karena adanya krisis moneter pada tahun 1997 yang diikuti dengan krisis politik, mengakibatkan keterpurukan di semua sektor termasuk sektor kelistrikan. Akibatnya banyak industri yang berhenti beroperasi dan menurunnya konsumsi terhadap listrik. Dengan kejadian ini pembangunan PLTN menjadi tidak relevan lagi.

Hal yang mengejutkan terjadi yaitu setelah terjadinya krisis moneter permintaan terhadap listrik kembali meningkat bahkan cenderung tinggi. Hasil studi menyimpulkan bahwa dari cadangan sumber energi yang ada terutama bahan fosil, tidak akan dapat mencukupi kebutuhan listrik secara nasional hingga tahun 2025. Konsekuensinya adalah harus diupayakan penggunaan sumber energi lain termasuk penggunaan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) untuk menutupi kekurangan tersebut. Yang termasuk energi baru dan terbarukan diantaranya adalah energi matahari, angin, panas bumi, air, biodiesel dan tenaga nuklir.

Berturut-turut kemudian ditetapkan kebijakan baru di bidang energi yaitu Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Undang-undang Nomor 17 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang (RPJP). Pada Perpres Nomor 5 Tahun 2006 ditetapkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan listrik hingga tahun 2025 dibutuhkan kontribusi sumber energi terbarukan, masing-masing sebesar : biofuel di atas 5%, panas bumi di atas 5%, nuklir, surya, angin dan biomassa di atas 5% dan batubara yang dicairkan di atas 2%. Dengan mendasarkan pada kondisi tersebut dan sudah ditetapkannya peraturan perundangan yang mendasari maka pemerintah berencana akan membangun PLTN dan diharapkan listrik akan masuk pada..mulai tahun 2017.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Sebagaimana diakui oleh negara-negara yang sudah lebih dulu mengoperasikan PLTN maka seiring dengan meningkatnya kebutuhan listrik, pembangunan PLTN yang pertama pasti akan diikuti dengan pembangunan PLTN berikutnya. Demikian juga di Indonesia, apabila nanti di Jepara akan dibangun beberapa unit maka harus disiapkan lokasi lain untuk mengantisipasi pembangunan-pembangunan PLTN yang lain.

Oleh karena itu saat ini sedang dilakukan studi pemilihan calon tapak baru di luar Jepara. Berdasarkan studi awal sudah diperoleh daerah potensial baru yaitu di wilayah Banten (Pulau Panjang dan Bojonegara) dan Pulau Bangka Belitung (Tanjung Berdaun dan Tanjung Berani). Kedua lokasi tersebut terus dilakukan pengkajian yang lebih intensif untuk melakukan data terkini masyarakat calon tapak PLTN.

Bahan Bakar Reaktor Fisi

Bahan bakar reaktor fisi adalah radioisotop yang dapat berfisi (fisil), yang dapat diperoleh di alam. Tetapi karena beberapa bahan fisil dapat dibuat dari bahan dapat membiak (fertil), maka beberapa jenis bahan fertil yang dibutuhkan sebagai bahan baku pembuat bahan fisil juga digolongkan sebagai bahan bakar reaktor fisi. Bahan fisil U-233, U-235, Pu-239 dan Pu-241 serta bahan fertil Th-232 dan U-238 adalah bahan bakar dari beberapa tipe reaktor fisi yang telah dikembangkan hingga awal abad 21 ini. Proses pembuatan bahan fisil dari bahan fertil dapat dilakukan dalam sebuah reaktor fisi, proses ini disebut sebagai proses pembiakan. Oleh karena itu, dalam reaktor fisi terdapat tipe reaktor yang disebut sebagai reaktor pembiak karena dalam reaktor ini selain dilangsungkan reaksi fisi kontinu juga dilangsungkan proses pembiakan bahan fisil dari bahan fertil.

a. Proses produksi bahan bakar

Reaktor nuklir fisi yang saat ini beroperasi sebagian besar menggunakan bahan bakar dari bahan fisil U-235. Dari 436 unit reaktor yang beroperasi pada tahun 2009 (data *Power Reactor Information System IAEA*, Maret 2009), 434 diantaranya memanfaatkan U-235 sebagai bahan bakarnya. Hanya ada dua reaktor pembiak yang dapat memanfaatkan bahan fertil U-238. Pemanfaatan bahan bakar thorium masih belum populer di dunia.

Uranium tergolong sebagai logam tanah jarang, oleh karena itu proses

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

produksi bahan bakar uranium mirip dengan proses produksi logam tanah jarang sejenisnya. Skema proses produksi bahan bakar uranium ditunjukkan pada gambar berikut ini.

Gambar di atas menjelaskan produksi bahan bakar uranium dari bijih uranium (*uranite*) menjadi senyawa U_3O_8 yang berbentuk tepung berwarna kuning (*yellow cake*). Biji uranium banyak terdapat di USA Barat, Kanada, Australia, Afrika Selatan, Rusia dan Zaire.

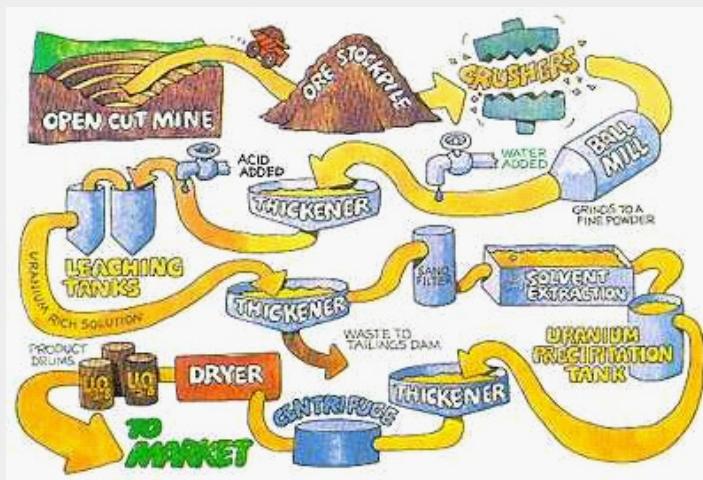
Bahan bakar uranium diperdagangkan dalam bentuk yellow cake. Yellow cake mengandung uranium alam murni, dalam uranium alam murni terdapat isotop U-234 ($^{92}U^{234}$) U-235 ($^{92}U^{235}$) dan U-238 ($^{92}U^{238}$), masing-masing mempunyai kandungan 0,0055%, 0,72% dan 99,2745%. Dari isotop uranium dalam yellow cake ini hanya U-235 saja yang dapat langsung berfisi (U-235 adalah bahan fisil). Kandungan bahan fisil dalam yellow cake (U_3O_8) yang hanya 0,72% terlalu kecil untuk menggerakkan reaksi fisi dalam reaktor nuklir (hanya beberapa tipe reaktor nuklir saja yang dapat dioperasikan dengan uranium alam dengan kandungan U-235 rendah, diantaranya adalah reaktor tipe Heavy Water Reactors (HWR). Oleh karena itu, kandungan U-235 harus ditingkatkan hingga sekitar 3%.

Proses peningkatan kandungan U-235 dalam bahan bakar uranium disebut proses pengayaan uranium. Proses pengayaan U-235 tidak dapat secara bebas dilakukan, karena apabila pengayaannya mencapai 100% maka dapat digunakan sebagai bahan baku senjata nuklir. Saat ini kondisi uranium di pasar dunia dalam bentuk UF_4 (*uranium tetrafluorida*) dengan kadar U-235 hingga 20% diperdagangkan dengan bebas. Selanjutnya UF_4 dapat diubah dengan mudah menjadi logam uranium dengan proses kalsinasi sebagai berikut.



Uranium dalam bentuk logam ataupun uranium oksida (UO_2) dibentuk menjadi pil (*pellet*) berbentuk silinder berdiameter ~1 cm dan tinggi ~1 cm, kemudian dimasukkan ke dalam kelongsong (*cladding*) setinggi ~4 meter. Setelah kedua ujung kelongsong ditutup dan dilas, batang elemen bahan bakar (*fuel rod*) ini disusun dalam bentuk konfigurasi 9 x 9 atau 17 x 17 membentuk suatu perangkat bahan bakar (*fuel assembly*). Perangkat bahan bakar inilah yang kemudian ditempatkan ke dalam reaktor nuklir dan berfungsi sebagai bahan bakar reaktor. Susunan perangkat bahan bakar

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi



gambar 77.
Skema proses
produksi
uranium

membentuk struktur inti atau teras reaktor (*reactor core*).

b. Proses Pembakaran Pada Reaktor Fisi

Berbagai reaksi nuklir dapat terjadi dalam sebuah reaktor nuklir fisi (reaksi fisi, reaksi transmutasi nuklir, atau peluruhan radioaktif). Reaksi nuklir dapat terjadi baik pada bahan bakar maupun pada struktur konstruksi penunjang di dalam reaktor. Pembakaran pada reaktor fisi adalah proses berkurangnya bahan fisil maupun fertil karena suatu reaksi nuklir, dan tidak semua reaksi nuklir yang terjadi akan membangkitkan energi dalam bentuk panas.

Bahan bakar nuklir reaktor fisi yang digunakan pada saat ini adalah bahan fisil U-235. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang banyak beroperasi pada saat ini menggunakan bahan bakar UO_2 (uranium dioksida) dengan pengayaan U-235 sebesar 3% hingga 5%. Pengayaan 3- 5% sangat sesuai untuk PLTN reaktor air ringan (*Light Water Reactors*, LWR), terutama untuk tipe PWR (*Pressurized Water Reactors*). PLTN tipe PWR dengan daya 1000 MW listrik (1000 MWe) yang beroperasi selama satu tahun membutuhkan bahan bakar uranium seberat 27.282 kg (27,3 ton). Oleh karena berat jenis uranium 19.050 kg/m³ (19,05 gr/cc), maka bahan volumenya sangat kecil yaitu 1,4321 m³. Untuk mengangkut bahan bakar PLTN PWR 1000 MWe yang akan digunakan selama setahun cukup digunakan 1 unit truk, dan pengisian atau pemenuaan bahan bakar hanya dilakukan sekali dalam setahun. PLTN

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

PWR baru yang lebih efisien bahkan hanya memerlukan sekali pengisian dalam satu setengah tahun operasi.

Seperti ditunjukkan pada gambar 80, dari 27,3 ton bahan bakar yang dipasang dalam PLTN PWR 1000 MWe, yang benar-benar akan menjadi limbah hanya 927 kg (berupa produk fisi umur pendek/stabil 818 kg, produk fisi radioaktif utama 82 kg dan produk fisi umur panjang 27 kg), sedangkan bahan sisanya seberat 26.355 kg dalam bentuk uranium, plutonium dan aktinida minor, masih dapat didaur ulang. Limbah radioaktif produk fisi berumur panjang seperti teknesium-99(Tc-99) dan Iodium-129(I-129) dapat diubah menjadi unsur stabil dengan proses transmutasi nuklir.

gambar 78.
Pelet bahan
bakar



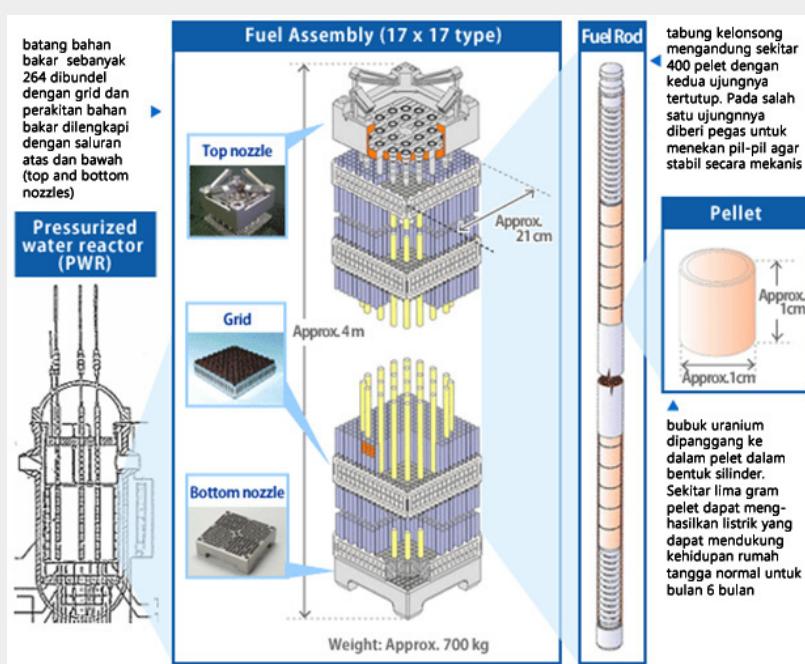
Pemakaian bahan bakar fisi dengan sekali pakai (*one through*) tanpa didaur ulang akan cepat menghabiskan cadangan sumber bahan fisil (U-235). Dengan cara pemakaian seperti ini, cadangan uranium dunia hanya bisa dipakai ~50 tahun saja. Tetapi apabila semua reaktor nuklir memanfaatkan metode daur ulang maka cadangan sumber uranium akan masih bisa

bertahan hingga seratus kali lipat, yaitu 5000 tahun. Reaktor masa depan sudah akan memanfaatkan teknologi pembiaci yang dapat memanfaatkan bahan nuklir hasil daur ulang, atau bahkan memanfaatkan seluruh bahan fisil maupun fertil dalam sekali proses di teras reaktor nuklir. Reaktor pembiaci dapat didesain untuk memanfaatkan bahan fisil dan fertil dalam teras tanpa membutuhkan proses daur ulang di luar teras reaktor. Dalam reaktor pembiaci, bahan fisil dibuat dengan mentransmutasikan U-238 menjadi bahan fisil

Pu-239 dan Pu-241, dengan demikian umur operasi reaktor dapat lebih lama (sekali pemakaian bahan bakar, reaktor dapat beroperasi hingga puluhan tahun) dan pemakaian sumber bahan bakar uranium menjadi lebih hemat.

Selain uranium, thorium juga dapat dijadikan sebagai bahan bakar reaktor nuklir fisi. Keberadaan cadangan sumber thorium di alam tiga hingga empat kali lebih banyak dari cadangan uranium. Apabila dikemudian hari kedua jenis bahan bakar nuklir dapat dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya maka masih mempunyai cadangan sumber bahan bakar nuklir untuk pemakaian selama 20000 hingga 25000 tahun.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi



gambar 79.
Susunan
konstruksi bahan
bakar nuklir dari
pil hingga teras
reaktor PWR

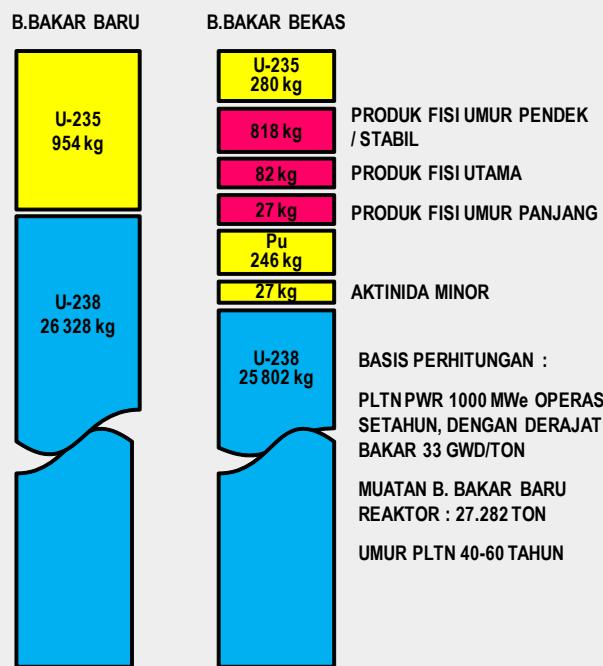
c. Pengelolaan Bahan Bakar Bekas

Beragam reaksi nuklir terjadi dalam sebuah reaktor fisi, hanya reaksi fusi yang tidak mungkin terjadi dalam reaktor fisi karena reaksi fusi membutuhkan kondisi temperatur yang sangat tinggi, sedangkan temperatur maksimum dalam reaktor fisi hanya mencapai 2000°C (temperatur rata-rata $\sim 300^{\circ}\text{C}$). Reaksi fisi adalah merupakan reaksi nuklir yang paling dominan dalam reaktor fisi. Bahan bakar nuklir dimuatkan ke dalam teras reaktor untuk masa operasi selama satu hingga satu setengah tahun. Pada sistem daur sekali pakai (*one through*) yang banyak dianut oleh sebagian besar reaktor fisi yang beroperasi pada saat ini, bahan bakar bekas dikelola sebagai limbah radioaktif.

Pada saat reaktor nuklir beroperasi, dalam teras reaktor terdapat populasi partikel neutron dengan jumlah yang sangat besar bila dibandingkan dengan populasi neutron di alam. Bila dilakukan pengukuran dalam teras reaktor PLTN akan terdapat neutron dengan kuantitas fluks neutron 10^{11}

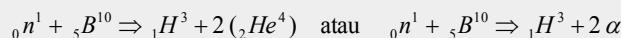
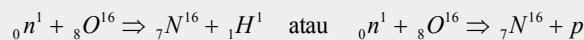
Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

gambar 80.
Komposisi bahan
bakar sebelum
dan setelah
dipakai dalam
PLTN PWR 1000
MWe

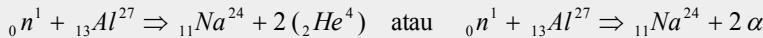


radioaktif. Proses ini disebut proses aktivasi neutron.

Aktivasi neutron dapat menimbulkan limbah radioaktif selama reaktor beroperasi. Beberapa contoh unsur radioaktif yang dihasilkan dari reaksi aktivasi neutron adalah ${}_{7}N^{16}$, ${}_{1}H^3$, ${}_{11}Na^{24}$, ${}_{27}Co^{60}$.



Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi



Limbah radioaktif PLTN terdiri dari limbah dengan radioaktivitas tingkat tinggi yang berasal dari bahan bakar bekas dan limbah aktivitas tingkat sedang dan rendah yang berasal dari bahan bakar bekas atau zat radioaktif produk aktivasi neutron. Limbah operasional PLTN sebagian besar mempunyai tingkat radioaktivitas rendah dan tinggi.

PLTN PWR yang mempunyai umur operasi 40 tahun, selama operasi akan menghasilkan bahan bakar bekas sebanyak $27,3 \text{ ton} \times 40 \text{ tahun} = 1092 \text{ ton}$. Jika bahan bakar bekas ini diolah ulang, maka limbah aktivitas tinggi yang dihasilkan oleh bahan bakar bekas selama umur PLTN (40 tahun) tidak lebih dari 40 ton. Limbah operasional berasal dari sistem purifikasi pendingin dan udara serta peralatan, seperti penyaring (filter) udara dan penyaring air pendingin. Dalam air pendingin dan udara dapat saja terlarut zat-zat radioaktif yang berasal dari reaksi aktivasi neutron. Limbah ini dekelola sebagai limbah tingkat aktivitas rendah dan sedang, dan volumenya dapat mencapai 800 ton per tahun untuk PLTN PWR 1000 MWe.

Limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang cukup disimpan di bawah permukaan tanah dengan kedalaman sekitar lima meter, sedangkan limbah radioaktif tingkat tinggi disimpan di bawah permukaan tanah dengan kedalaman lebih dari tiga ratus meter.

Limbah radioaktif digolongkan menjadi tiga, yaitu limbah aktivitas rendah, limbah aktivitas sedang dan limbah aktivitas tinggi, masing-masing mempunyai batasan/definisi sebagai berikut.

1. Limbah radioaktif tingkat rendah adalah limbah yang menimbulkan paparan $0,1 - 5 \text{ mSv/tahun}$
2. Limbah radioaktif tingkat sedang/intermediet adalah limbah yang menimbulkan paparan $5 \text{ mSv/tahun} - 2 \text{ Sv/tahun}$
3. Limbah radioaktif tingkat tinggi adalah limbah yang menimbulkan paparan lebih 2 Sv/tahun

Kuantitas dosis radiasi yang dapat menimbulkan kematian seketika disebut dosis letal, mempunyai nilai dosis 10 Sv .

Selain mempertimbangkan tingkat radioaktivitas, terdapat juga

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

pengelompokan limbah radioaktif yang mempertimbangkan umur paronya. Dalam pengelompokan ini dikenal limbah radioaktif kelas A, B dan C. Masing-masing dengan definisi sebagai ditunjukkan pada gambar berikut ini.

d. Daur bahan bakar reaktor fisi

Daur bahan bakar reaktor fisi berawal dari penambangan bijih uranite hingga penyimpanan limbah radioaktif yang dihasilkan oleh reaktor fisi. Bijih uranite diolah untuk menghasilkan uranium murni dalam bentuk yellow cake (U_3O_8) yang berupa tepung berwarna kuning. Selanjutnya tepung kuning U_3O_8 dikonversi menjadi UF_6 , U_3O_8 maupun UF_6 mengandung uranium alam murni dengan konsentrasi U-235 0,7%. Bentuk UF_6 sangat sesuai untuk umpan pada proses pengayaan untuk meningkatkan konsentrasi U-235 dari 0,7% menjadi 3%.

UF_6 yang telah dilakukan pengayaan U-235 menjadi 3% kemudian dikonversi menjadi uranium dioksida, dan kemudian dicetak dalam bentuk pil. Pil-pil ini kemudian dibakar mendekati titik lelehnya (proses sinter) agar diperoleh pil yang stabil. Pil ini selanjutnya dimasukkan dalam kelongsong yang pada kedua ujungnya ditutup. Pada salah satu ujungnya diberi pegas untuk menekan pil-pil agar stabil secara mekanis. Kelongsong yang telah diisi pil bahan bakar disebut batang bahan bakar atau elemen bahan bakar.

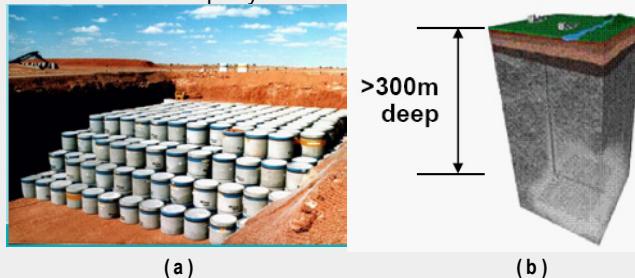
Batang bahan bakar yang disusun dalam bentuk struktur perangkat bahan bakar dimasukkan ke dalam reaktor nuklir. Dalam reaktor nuklir perangkat bahan bakar disusun membentuk inti reaktor atau teras reaktor. Setelah kandungan bahan fisil (U-235) dalam bahan bakar tidak dapat mempertahankan kontinuitas reaksi fisi dalam teras reaktor, bahan bakar tersebut dikeluarkan dari reaktor menjadi bahan bakar bekas. Dalam bahan bakar bekas masih terkandung 96,6% bahan bermanfaat yang masih dapat didaur ulang untuk kemudian digunakan dalam reaktor fisi nuklir. Material tak berguna yang benar-benar dapat dilimbahkan hanya 3,4% saja.

Proses olah-ulang bahan bakar (fuel reprocessing) adalah proses yang strategis, karena proses ini dapat digunakan untuk mengambil bahan-bahan bermanfaat dari bahan bakar nuklir bekas, termasuk plutonium yang dapat digunakan untuk membuat bom nuklir. Karena strategisnya proses olah-ulang, banyak negara yang tidak dapat melakukan proses ini dan karena itu bahan bakar bekas dari PLTN langsung dilimbahkan, membentuk daur

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

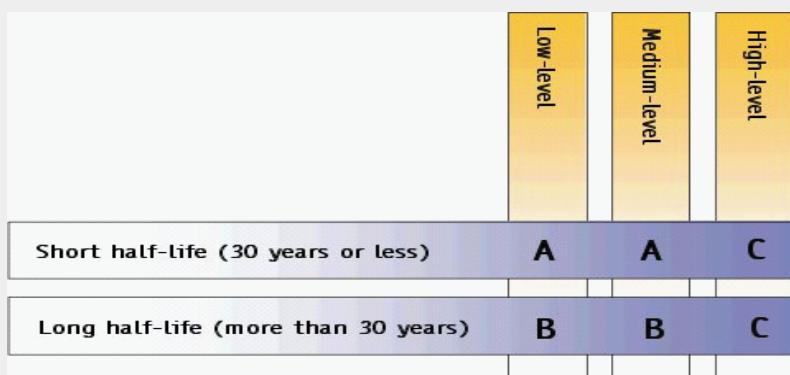
bahan bakar sekali pakai (*one through*). Penggunaan daur bahan bakar sekali pakai akan mengakibatkan pemborosan terhadap cadangan sumber energi nuklir.

Daur bahan bakar nuklir mempunyai dua sisi, yaitu sisi depan (*front*) dan sisi



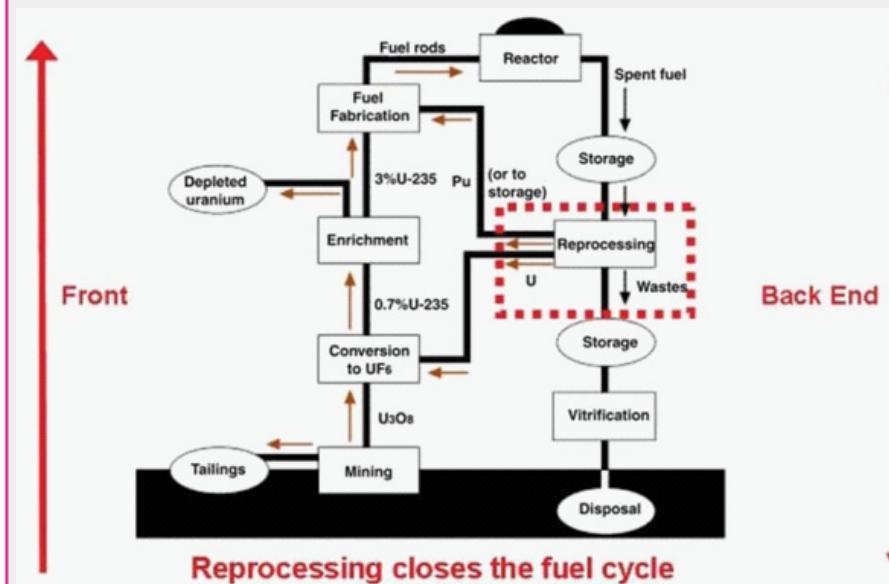
gambar 81.
Tempat
penyimpanan
limbah radioaktif
tingkat rendah-
menengah (a)
dan tinggi (b)

akhir belakang (*back end*). Sisi depan adalah sisi pengambilan uranium dari permukaan bumi untuk dimasukkan ke dalam reaktor. Sedangkan sisi akhir belakang adalah sisi proses mengembalikan material bekas dari reaktor nuklir ke pelimbahan (penyimpanan limbah).



gambar 82.
Pengelompokan
limbah radioaktif
tingkat A, B
dan C

gambar 83.
Daur bahan
bakar nuklir
reaktor fisi



3.2 Pemanfaatan Panas

Proses yang terjadi di dalam teras reaktor nuklir adalah konversi energi nuklir menjadi panas, yang berarti semua jenis reaktor dapat memproduksi panas. Beberapa jenis reaktor nuklir berpendingin air ringan (LWR, *Light Water Reactor*) maupun air berat (HWR, *Heavy Water Reactor*) dapat memproduksi panas hingga temperatur 300°C. Termasuk dalam jenis ini adalah reaktor air tekan (PWR, *Pressurized Water Reactor*), reaktor air didih (BWR, *Boiling Water Reactor*), reaktor air berat bertekanan (PHWR, *Pressurized Heavy Water Reactor*) dan reaktor air ringan bermoderator grafit (LWGR, *Light Water Graphite Moderated Reactor*).

Reaktor dengan moderator air berat dan pendingin organik (OCHWR, *Organic Cooled Heavy Water Reactor*) mampu memproduksi panas hingga 400°C. Reaktor pembiak cepat berpendingin logam cair (LMFBR, *Liquid Metal Fast Breeder Reactor*) mampu menghasilkan panas hingga 540°C. Reaktor berpendingin gas maju (AGR, *Advanced Gas Cooled Reactor*) menghasilkan

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

panas hingga 650°C. Reaktor bermoderator grafit dengan pendingin gas helium (HTGR, *High Temperature Gas Cooled Reactor*) menghasilkan panas hingga 950°C.

Kogenerasi Panas Nuklir

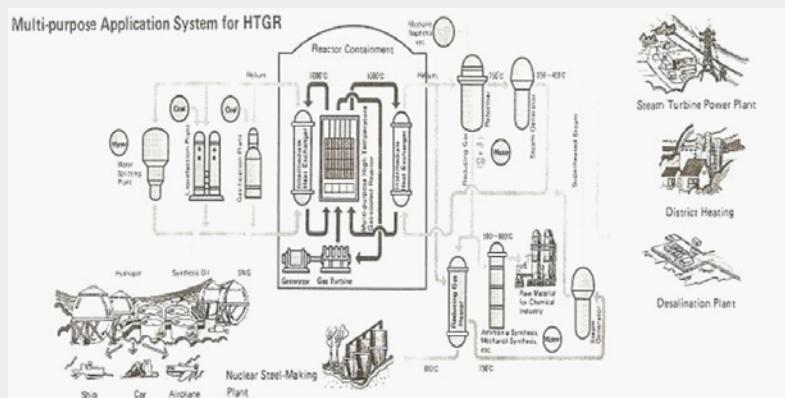
Selain untuk memproduksi listrik, panas proses hasil reaksi nuklir dapat juga dipakai sebagai sumber panas dalam kegiatan industri melalui teknik kogenerasi. Ada beberapa metode yang dapat ditempuh dalam kogenerasi ini, yaitu : kopel panas langsung, kogenerasi paralel serta kogenerasi seri. Pada kopel panas langsung, panas dari reaktor nuklir dipakai langsung untuk menyuplai panas dalam proses industri tanpa ada produksi listrik. Pada kogenerasi paralel, panas dari reaktor dipakai untuk membangkitkan uap dan secara paralel dipakai untuk produksi listrik untuk industri. Pada kogenerasi seri, uap yang dihasilkan selain dipakai untuk memproduksi listrik, juga dipakai untuk memenuhi kebutuhan panas pada proses industri yang berhubungan dengan pemanasan air/uap air, serta desalinasi air laut untuk irigasi pertanian.

Ada beberapa kegiatan industri dengan temperatur spesifik tertentu yang sumber panasnya dapat disuplai dari energi nuklir. Aktivitas tersebut antara lain adalah agro industri yang membutuhkan air dan uap panas dengan temperatur antara 20 – 100°C, serta desalinasi air laut untuk diubah menjadi air tawar melalui proses evaporasi dengan temperatur antara 100-200°C. Kegiatan industri dengan spesifik panas lainnya adalah : proses dalam industri kimia (200-400°C), eksplorasi minyak berat dari formasi tanah dalam (300-600°C), pengilangan minyak dan produksi olefin (500-800°C), reformasi gas alam (650-900°C), pengilangan batubara dan lignit (750-950°C) dan yang tertinggi adalah produksi gas hidrogen (di atas 1000°C). Ada pula proses industri dengan kebutuhan temperatur di atas 1000°C, seperti industri baja.

Konsep kogenerasi listrik dan panas telah dipelajari dan diaplikasikan di beberapa daerah bekas Uni Sovyet (Beloyarsky, Kurske, Novovoronezh, Rovno dan Kalskaya). Teknik ini dipelajari juga di Universitas Tsinghuai di China, Bruce Nuclear Power Development di Canada, Bohunice di Czechoslovakia, Goegen dan Beznan di Switzerland serta Stade di Jerman. Dua unit stasiun tenaga nuklir di Bohunice, Czechoslovakia, difungsikan sebagai pembangkit listrik dan menyediakan panas temperatur rendah untuk

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

gambar 84.
Proses
pemanfaatan
panas nuklir
Reaktor
Temperatur
Sangat Tinggi



Reaktor Temperatur Sangat Tinggi

Jepang bekerjasama dengan Jerman dan Amerika Serikat saat ini sedang mempelajari dan mengembangkan jenis reaktor serbaguna jenis HTGR (*Very High Temperature Gas-Cooled Reactor*) dengan temperatur maksimumnya hingga 1000°C. HTGR dirancang untuk memanfaatkan panas dari teras reaktor sebagai sumber panas secara langsung. Mengingat uap panas tidak dapat ditransportasikan dalam jarak jauh secara ekonomis, maka penggunaan panas reaktor hanya memberikan dampak ekonomi yang lebih baik jika digunakan untuk keperluan proses dalam industri yang berada di sekitar reaktor nuklir.

Karena itu perlu adanya kawasan industri terpadu yang kebutuhan panasnya disuplai oleh reaktor nuklir. Panas dari reaktor ini nantinya dapat disalurkan untuk berbagai keperluan, seperti memproduksi listrik dengan turbin gas

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

helium, proses industri, produksi hidrogen dengan proses termokimia, reduksi bijih besi dan gasifikasi batubara. Sisa panasnya juga masih dapat dimanfaatkan untuk pemanasan distrik dan desalinasi air laut.

Untuk mempelajari konsep reaktor serbaguna tersebut, *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) di Jepang saat ini sedang melakukan studi dan merancang reaktor eksperimental VHTGR dengan daya thermal 50 MW dan temperatur keluarannya mencapai 1000°C dengan sistem transfer panasnya menggunakan gas helium (He). Proses pemanfaatan panas nuklir dari reaktor ini adalah seperti ditunjukkan pada diagram (gambar 84) .

Konsep kogenerasi panas nuklir dengan reaktor serbaguna HTGR (JAERI)

Gas Helium sistem primer mengambil panas proses nuklir dengan temperatur 1000°C dari teras HTGR. Sebagian gas He dialirkan menuju turbin gas untuk memproduksi listrik dengan generator. Sebagian gas He dialirkan menuju penukar panas menengah (*intermediate heat exchanger*) sehingga terjadi pertukaran panas dengan gas He pada sistem sekunder. Penukar panas menengah ini juga berperan sebagai distributor panas untuk berbagai kegiatan. Setelah diambil panasnya baik oleh turbin maupun penukar panas menengah, temperatur gas He turun menjadi 350-400°C dan dipompakan lagi ke teras reaktor oleh sirkulator helium, demikian seterusnya sehingga membentuk siklus He sistem primer.

Gas He sistem sekunder dengan temperatur 930°C dialirkan menuju reformer dan pembangkit uap (*steam generator*) untuk memproduksi uap sangat panas (temperatur 500-600°C) yang dapat dimanfaatkan untuk proses dalam industri, seperti sintesa ammonia, metanol dan sebagainya sehingga dihasilkan bahan baku untuk industri kimia. Sebagian gas He sistem sekunder dengan temperatur 930°C juga dialirkan menuju penukar panas (*heat exchanger*) untuk menaikkan temperatur uap panas dari reformer hingga mencapai 850°C. Uap ini selanjutnya dipakai untuk mereduksi bijih besi, sehingga dihasilkan bahan baku untuk industri baja.

Setelah terjadi pengalihan sebagian panas, temperatur gas He pada sistem sekunder turun menjadi 750°C. Gas ini selanjutnya dialirkan menuju pembangkit uap untuk menghasilkan uap sangat panas yang dipakai



gambar 85.
Kebutuhan
panas dan listrik
kawasan industri
terpadu dapat
disuplai
oleh reaktor
nuklir temperatur
tinggi

untuk memutar turbin dan memproduksi listrik dengan generator. Sisa panas dalam uap yang keluar dari turbin masih dapat dimanfaatkan untuk pemanasan distrik dan desalinasi air laut. Setelah terjadi berulangkali pengalihan panas, temperatur gas He sistem sekunder akan turun menjadi 280°C. Gas ini selanjutnya dipompakan oleh sirkulator helium menuju penukar panas menengah untuk mengambil panas lagi. Demikian seterusnya sehingga membentuk siklus He sistem sekunder.

Reaktor serbaguna HTGR dapat berperan banyak sebagai sumber panas pada suatu kawasan industri terpadu yang proses di dalamnya memerlukan panas dalam jumlah banyak. Sistem cogenerasi ini memungkinkan pemanfaatan panas nuklir dari reaktor dapat dilakukan secara optimal untuk berbagai keperluan.

3.3 Baterai Nuklir

Radioaktivitas adalah peristiwa pemancaran sinar radioaktif secara spontan karena terjadinya peluruhan suatu inti atom yang berubah menjadi inti atom lainnya. Bahan yang mampu menunjukkan gejala radioaktivitas, atau mampu memancarkan radiasi secara spontan, disebut bahan radioaktif. Perkenalan manusia dengan radiasi dari unsur radioaktif ini bermula pada tahun 1896, ketika fisikawan berkebangsaan Perancis Antonie Henri Becquerel mengamati unsur uranium (U) yang dapat menghitamkan film fotografi karena radiasi yang dipancarkan.

Dengan diketemukannya gejala radioaktivitas pada unsur U tadi, maka fenomena keradioaktifan suatu bahan mulai dipelajari secara intensif oleh para peneliti. Pada tahun 1898, pasangan suami istri ahli kimia berkebangsaan Perancis, Marie Curie dan Pierre Curie, menemukan dua unsur radioaktif baru yang diberi nama polonium (Po) dan radium (Ra). Pada tahun 1899,

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

unsur radioaktif actinium (Ac) menyusul ditemukan oleh kimiawan Perancis Andre Louis Debienre. Pada tahun yang sama, gas radioaktif radon (Rn) ditemukan oleh fisikawan Inggris Ernest Rutherford dan Frederick Soddy. Unsur-unsur radioaktif baik yang ditemukan oleh Becquerel, Curie maupun peneliti lainnya merupakan unsur-unsur radioaktif alam, yang diduga terbentuk bersamaan dengan proses terbentuknya alam.

Marie Curie dan Pierre Curie pada akhir abad ke-19 telah melakukan pengukuran panas yang muncul dari peluruhan inti radioaktif Ra. Mereka mendapatkan bahwa 1 gram Ra dapat melepaskan sekitar 100 kalori energi setiap jamnya. Pancaran energi ini berlangsung terus hingga pengamatannya berjalan bertahun-tahun. Sementara itu, pembakaran sempurna 1 gram batubara hanya menghasilkan energi total sebesar kurang-lebih 8000 kalori. Segera setelah pengamatan itu, unsur-unsur radioaktif dikenali sebagai sumber energi yang jauh lebih mampat dibandingkan dengan sumber energi lain yang sudah dikenal saat itu. Energi kimia seperti yang keluar pada saat pembakaran bahan bakar fosil hanya berorde elektron Volt (eV) untuk setiap atomnya. Sementara itu, peluruhan inti radioaktif memancarkan radiasi dengan energi berorde hingga Mega elektron Volt (MeV) untuk setiap atomnya, yang berarti sejuta kali lebih tinggi dibandingkan energi kimia dari bahan bakar fosil.

Berbeda dengan PLTN yang memproduksi listrik dengan memanfaatkan panas hasil reaksi fisi (reaksi pembelahan inti atom), energi radiasi yang dipancarkan oleh inti-inti radioaktif dapat diubah secara langsung menjadi listrik arus searah (DC) dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan teknik termokopel. Teknik ini pertama kali ditemukan pada tahun 1826 oleh Thomas Johann Seebach, yaitu terjadinya arus listrik karena perbedaan suhu ujung-ujung logam yang saling berhubungan. Gejala ini menunjukkan bahwa energi dalam bentuk panas dapat berubah menjadi energi listrik.

Efek Seebach ini dapat terjadi pada sebatang logam yang suhu ujung-ujungnya tidak sama. Perbedaan suhu ini menyebabkan terjadinya aliran elektron dari ujung yang panas menuju ujung yang lebih dingin. Aliran elektron menimbulkan arus yang disebut arus termolistrik, sedang elemen yang memanfaatkan fenomena ini disebut termoelemen. Energi radiasi yang dipancarkan unsur radioaktif dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas termokopel. Kemampuan mensuplai panas ini bergantung pada umur paro unsur radioaktif yang digunakan. Daya pakai termoelemen bisa sangat

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

panjang yang umumnya mencapai dua kali umur paro unsur radioaktif yang digunakannya. Umur atau waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh unsur radioaktif untuk meluruh sehingga jumlahnya susut menjadi setengah dari jumlah semula. Zat radioaktif yang sudah berumur dua kali waktu paro berarti jumlahnya tinggal seperempat dari jumlah semula.

Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)

Termoelemen yang memanfaatkan radiasi radioaktif sebagai sumber panasnya disebut baterai nuklir. Unsur radioaktif dalam baterai nuklir ini bisa berupa unsur radioaktif alamiah maupun buatan. Baterai nuklir dapat berperan sebagai sumber arus searah sebagaimana baterai kimia yang sudah kita kenal, baik dalam bentuk sel basah maupun sel kering. Ada berbagai jenis baterai nuklir yang prinsip kerja serta jenis unsur radioaktif yang digunakannya berbeda-beda. Salah satunya adalah baterai nuklir jenis termokopel yang memanfaatkan panas dari radiasi.

Pembuatan dan pengembangan baterai nuklir cukup mendapatkan perhatian di kalangan peneliti, mengingat kemampuan baterai nuklir dalam menyuplai tegangan listrik dalam orde beberapa ribu volt dan relatif konstan dalam waktu yang sangat lama. Pada tahun 1950-an, para peneliti mendapatkan bahwa efisiensi pengubahan panas radiasi menjadi listrik dapat lebih tinggi apabila digunakan sambungan termokopel dari bahan semikonduktor seperti silikon (Si) dan germanium (Ge). Konversi tertinggi saat ini yang dapat dicapai adalah sekitar 5 %. Namun dengan berbagai teknologi konversi yang saat ini sedang dikembangkan, efisiensi baterai nuklir diharapkan dapat mencapai 20 % di masa mendatang.

Para peneliti saat ini tengah berupaya untuk meningkatkan pemanfaatan baterai nuklir untuk menyuplai kebutuhan listrik dalam kegiatan-kegiatan tertentu, terutama dalam misi penyelidikan ruang angkasa. Dalam kaitannya dengan misi ruang angkasa ini, Departemen Energi Amerika Serikat (DOE) bekerjasama dengan National Aeronautic and Space Administration (NASA) mengembangkan baterai nuklir yang diberi nama *Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)*.

Baterai nuklir RTG berbentuk silinder dengan tinggi 45 inchi (114 cm), diameter 18 inchi (45 cm) dan beratnya 123,5 pound (62 kg). Radioisotop plutonium-238 dimanfaatkan sebagai sumber panas. Plutonium meluruh

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

memancarkan radiasi alpha dengan energi 5,5 MeV. Panas radiasi dari plutonium ini selanjutnya diserap oleh bagian termokopel berupa sambungan semikonduktor Si-Ge. Elektron akan mengalir dari bagian semikonduktor panas yang berdekatan dengan plutonium-238 (Pu-238) menuju ke bagian yang lebih dingin sehingga menghasilkan tegangan listrik. Karena menggunakan radioisotop Pu-238 yang umur paronya 87,7 tahun, praktis baterai nuklir RTG yang mempunyai umur efektif dua kali waktu paro unsur radioaktif yang digunakannya itu mampu beroperasi menyediakan tegangan listrik bagi wahana ruang angkasa selama 175 tahun.

Untuk menjaga agar baterai nuklir tidak menjadi terlalu panas, maka pada bagian luar baterai juga dilengkapi dengan tabung pendingin (*cooling tubes*) dan sirip-sirip pendingin (*fins tube*). Panas dari dalam baterai nuklir diambil oleh aliran gas dalam tabung pendingin dan dibuang keluar oleh sirip pendingin.

Bahan bakar RTG adalah oksida plutonium berbentuk keramik yang telah berulang kali menjalani pengujian keselamatan, baik dengan simulasi ledakan maupun kebakaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa radiosotop dalam baterai nuklir tersebut tahan terhadap panas sangat tinggi dan tidak dapat larut dalam air apabila terjadi kecelakaan dalam penggunaannya. Berbagai jenis bahan pelapis juga digunakan untuk melindungi bahan bakar dan mencegah pelepasan unsur radioaktif jika terjadi kecelakaan.

Misi Ruang Angkasa

Baterai nuklir RTG memegang peranan yang sangat penting dalam berbagai misi ruang angkasa yang dilakukan NASA. Pada Penerbangan Apollo 11 bulan Juli 1969 untuk penyelidikan bulan, RTG berperan sebagai sumber energi untuk *lunar surface seismic experimental package*. Pada penerbangan Apollo 12 (Nopember 1969), RTG menyuplai kebutuhan listrik perangkat *lunar surface module*, dan seterusnya hingga penerbangan Apollo 17 (Desember 1972), RTG tetap berperan penting sebagai sumber energi listrik dalam misi penyelidikan bulan tersebut. Pada peluncuran wahana ruang angkasa Viking 1 (Agustus 1975) dan Viking 2 (September 1975) untuk penyelidikan planet Mars, baterai nuklir RTG digunakan sebagai sumber energi untuk sistem Lander.

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

Wahana ruang angkasa Voyager dirancang untuk beroperasi menjalankan misinya di ruang angkasa selama kurang lebih 50 tahun, dengan misi utamanya menyelidiki planet Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus dan kondisi di sekitarnya. Wahana yang diluncurkan pada bulan Agustus 1977 (Voyager-2) dan September 1977 (Voyager-1) itu akan terus menjalankan misinya dan mengirimkan data-data pengamatannya ke bumi hingga 25 tahun mendatang, sebelum akhirnya keduanya akan melayang dan menetap di ruang antar planet dengan jarak sekitar 130-140 juta mil dari bumi. Voyager-1 dan 2 kini berada pada jarak jutaan kilometer dari permukaan bumi, meluncur sangat cepat menembus sistem tatasurya dengan kecepatan antara 36.000 – 39.000 mil per jam. Dalam misi Voyager ini, RTG menjalankan segala-galanya, mulai dari penyediaan listrik untuk operasi komputer hingga memproses serta mengirimkan datanya ke bumi.

Wahana ruang angkasa Galileo paling tidak menghabiskan waktu dua tahun untuk mengamati satu buah planet, yaitu Jupiter. Wahana yang diluncurkan pada bulan Oktober 1989 ini baru mencapai tujuan pada bulan Desember 1995, setelah kurang lebih enam tahun menempuh perjalanan. Galileo diharapkan menjalankan misinya selama 8 tahun dengan mengandalkan baterai nuklir RTG berkekuatan 285 Watt.

Ulysses merupakan wahana ruang angkasa yang dipersiapkan NASA untuk menyelidiki matahari. Diluncurkan pada bulan Oktober 1990, Ulysses yang dilengkapi dengan baterai nuklir RTG 303 Watt mengembangkan misi mengorbit di daerah kutub matahari. Setelah sukses dan lengkap mengamati kutub matahari bagian selatan, mulai bulan Juni 1995 melakukan perjalanan baru untuk mengamati kutub matahari bagian utara. Misi Ulysses berakhir pada bulan Desember 2001.

Penyelidikan planet Saturnus dilakukan dengan wahana ruang angkasa Cassini yang diluncurkan NASA pada bulan Oktober 1997. Pesawat Cassini yang dilengkapi dengan baterai nuklir RTG berkekuatan 275 Watt ini mengembangkan misi untuk menyelidiki cincin Saturnus dan bulan-bulan yang mengelilinginya selama empat tahun. Targetnya adalah mengamati Titan yang merupakan bulan terbesar di planet itu.

Untuk menyelidiki planet Pluto dan lingkungannya, NASA mempersiapkan wahana ruang angkasa Pluto Express yang rencananya akan diluncurkan tahun 2003 mendatang. Karena Pluto merupakan planet terluar dari

Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

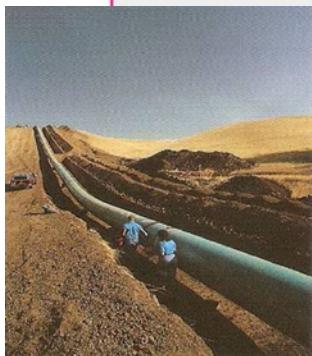
sistem tatasurya dan juga merupakan planet terjauh dari bumi, akan diperlukan waktu sekitar 10 tahun untuk menempuh perjalanan ke sana. Untuk mendukung suksesnya misi tersebut, pada wahana ini akan dilengkapi dengan baterai nuklir berteknologi baru yang mampu mengubah panas radiasi Pu-238 menjadi listrik dengan efisiensi hingga 5 kali lebih tinggi dibandingkan dengan baterai nuklir RTG yang digunakan saat ini. Baterai nuklir jenis terbaru ini diberi nama Radioisotope Power Source, yang saat ini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan (*).



Bab 3 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Energi

gambar 86.
Pemeriksaan
Sambungan
Mutu Las Pada
Pipa (atas)
Pemeriksaan
Kualitas Logam
Cor Badan
Pesawat Terbang
(bawah)
(sumber : AGFA,
Germany)

Masyarakat lebih mengenali manfaat nuklir terutama dalam bidang energi melalui pengoperasian pusat listrik tenaga nuklir (PLTN). Namun pada umumnya masyarakat awam kurang mengenali aplikasi teknik nuklir di luar energi yang memanfaatkan reaktor penelitian secara langsung, dalam hal ini aplikasi teknik nuklir dilakukan di dalam gedung reaktor. Selain itu, masih banyak aplikasi teknik nuklir dalam berbagai bidang kehidupan yang dapat dilakukan di luar reaktor penelitian, dalam hal ini aplikasi tersebut melibatkan penggunaan radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop atau sumber radiasi. Secara garis besar, jenis aplikasi teknik nuklir di luar energi ini dapat dikelompokkan ke dalam empat kegiatan utama, yaitu aplikasi dalam bidang kedokteran, pertanian, industri dan hidrologi.



4.1 Radiografi Industri

Pemeriksaan tak merusak dalam menentukan kualitas suatu sistem dapat dilakukan baik dengan metode teknik nuklir maupun non-nuklir. Radiasi berdaya tembus tinggi dapat dipakai untuk melakukan pemeriksaan bahan tanpa merusak bahan yang diperiksa, dikenal dengan nama uji tak merusak (*non destructive testing*). Teknik pemeriksaan dengan radiasi ini disebut juga radiografi industri. Uji tak merusak ini biasanya memanfaatkan radiasi jenis foton berdaya tembus tinggi, baik berupa sinar gamma yang dipancarkan oleh radioisotop maupun sinar-X dari suatu pesawat. Radiasi itu sendiri sebagian diserap dan sebagian diteruskan oleh bahan yang diperiksa, oleh sebab itu radiasi akan mengalami pelembahan di dalam bahan. Tingkat pelembahannya bergantung pada tebal bagian bahan yang menyerap radiasi.

Prinsip dasar dalam uji tak merusak ini adalah bahwa radiasi akan menembus benda yang diperiksa, namun karena adanya cacat dalam bahan maka banyaknya radiasi yang diserap oleh bagian-bagian pada bahan tidak sama. Dengan memanfaatkan sifat interaksi antara radiasi foton dengan bahan seperti ini, maka radiasi dapat dimanfaatkan untuk memeriksa cacat yang ada di dalam bahan. Rongga

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

maupun retak sekecil apapun dapat dideteksi dengan teknik radiografi ini.

Apabila radiasi yang diteruskan atau dikeluarkan dari bahan ditangkap oleh film fotografi yang dipasang di belakang bahan tersebut, maka perbedaan intensitas radiasi akan menimbulkan kehitaman yang berbeda pada film, sehingga cacat dalam bahan yang diperiksa akan tergambar pada film. Dengan teknik ini dapat diketahui mutu sambungan las, kualitas logam cor dan juga keadaan dalam diri suatu sistem. Untuk mendapatkan ketelitian pemeriksaan yang lebih tinggi, maka teknik radiografi dapat dikombinasikan dengan teknik pemeriksaan lainnya. Karena tiap cacat pada benda menimbulkan gambar yang berlainan, maka untuk membaca gambar pada film diperlukan pengalaman dan keahlian tersendiri, sehingga kemungkinan terjadinya salah interpretasi dapat dihindari atau dikurangi.

4.2

Penentuan Keausan Alat

Semua alat yang dipakai lama-kelamaan akan menjadi aus. Keausan ini disebabkan oleh adanya gesekan permukaan. Namun keausan ini terjadi dalam jumlah yang sangat kecil sehingga sangat sulit untuk dievaluasi. Teknik nuklir dapat mengatasi kesulitan tersebut. Teknik yang digunakan untuk memeriksa keausan ini adalah dengan mengaktifkan bagian permukaan alat yang diamati. Dengan proses aktivasi maka bahan pada permukaan alat menjadi bersifat radioaktif sehingga mampu memancarkan radiasi. Aktivasi dapat dilakukan dengan cara irradiasi neutron di dalam teras reaktor.

Setelah proses aktivasi, tingkat aktivitas bagian alat yang akan diperiksa keausannya diukur dengan alat cacaht radiasi. Pengukuran ini akan menghasilkan data cacaht radiasi pada alat sebelum dipakai. Pengukuran yang sama dilakukan lagi setelah alat tersebut dipakai. Perbedaan cacaht radiasi antara sebelum dan setelah pemakaian ini disebabkan karena terjadinya keausan pada alat. Tingkat pengurangan hasil cacaht radiasi itu dapat dikorelasikan dengan tingkat keausan. Metode penelitian ini banyak dilakukan pada penelitian pendahuluan untuk mengetahui apakah alat tersebut bekerja sesuai dengan fungsinya.

gambar 87.
Tingkat keausan pada bagian-bagian mesin yang berputar dapat dipelajari dengan teknik nuklir yang dikenal dengan aktivasi lapisan tipis
(sumber : Nuovo Pignone-GE)



4.3

Penentuan Homogenitas Proses

Radioisotop dapat dimanfaatkan sebagai perunut dalam kegiatan industri. Banyak masalah dalam proses industri dapat diselesaikan dengan teknik

perunut radioisotop ini. Dengan teknik ini hampir setiap karakteristik suatu proses industri termasuk kelainan-kelainan yang terdapat pada sistem kerjanya, dapat diketahui untuk kemudian dijadikan masukan informasi bagi pabrik maupun industri yang bersangkutan. Kelebihan dari teknik perunut radioisotop ini adalah dapat dilakukan tanpa mengganggu atau menghentikan proses produksi yang sedang berjalan, sehingga kerugian waktu maupun biaya dapat dihindari. Teknik ini dapat diaplikasikan hampir pada setiap industri, seperti industri tekstil, semen, pupuk, kertas, minyak, besi baja dan peleburan aluminium.



gambar 88.
Tingkat homogenitas pada proses pencampuran bahan-bahan dalam kegiatan industri dapat dipelajari dengan teknik perunut radioisotop
(sumber : KEPCO, Rep. of Korea)

Proses pencampuran bahan-bahan dalam industri merupakan proses yang perlu dikontrol karena hasil proses tersebut dapat memengaruhi kualitas dari produk

yang dihasilkan industri tersebut. Dalam proses industri, misal pencampuran bahan X dan bahan Y akan dianggap sempurna apabila X dan Y tersebut telah bercampur secara homogen. Untuk mengetahui homogenitas campuran tersebut, maka ke dalam bahan pencampur dimasukkan suatu perunut radioisotop. Homogenitas campuran bahan X dan Y ditunjukkan oleh homogenitas radioisotop dalam campuran. Pengamatan proses pencampuran dapat dilakukan dengan pemantauan radiasi dari luar bak pencampur. Apabila hasil cacahan radiasi dari radioisotop yang dipakai sebagai perunut telah menunjukkan nilai cacahan yang merata pada semua bagian, maka proses pencampuran antara bahan X dan bahan Y telah sempurna.

Selain untuk mengamati proses pencampuran, perunut radioisotop dapat pula dipakai untuk mengamati proses aliran di dalam pipa. Seringkali agak sulit melakukan pengukuran kecepatan alir dalam pipa apabila yang mengalir di dalamnya adalah campuran antara zat cair dan zat padat. Dengan menentukan dua titik (tempat) dari pipa tersebut, maka teknik perunut radioisotop dapat menyelesaikan masalah ini dengan cara yang sangat

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

sederhana. Pada titik pertama, ke dalam pipa yang di dalamnya mengalir campuran yang akan diukur diinjeksikan radioisotop perunut, sedang pada titik kedua dipasang pemantau radiasi. Jangka waktu dari saat radioisotop mulai diinjeksikan hingga mulai tercacah oleh pemantau radiasi dapat diukur. Karena jarak antara titik pelepasan dan titik pencacahan radioisotop dapat diukur, maka laju alir dari campuran di dalam pipa dapat dihitung.

4.4

Pengelolaan Lingkungan

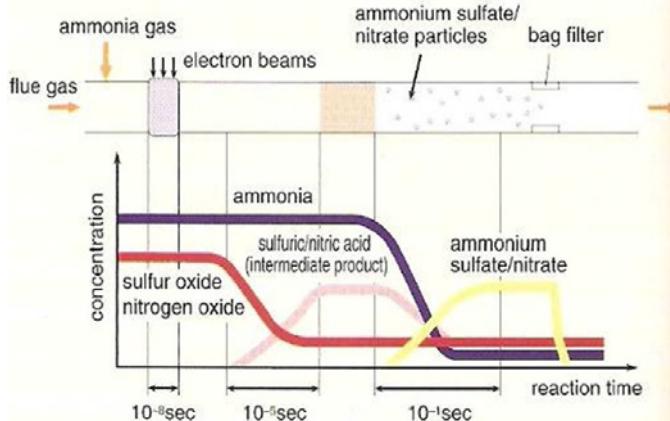
Pembersihan Polutan dengan Berkas Elektron

Dewasa ini manusia di berbagai belahan dunia mulai sadar akan perlunya menyelamatkan lingkungan dengan cara menjinakkan polutan-polutan yang terlepas ke lingkungan. Beberapa negara maju telah mengeluarkan peraturan sangat ketat dan menanamkan investasi cukup besar dalam rangka mengurangi polusi udara dari gas buang. Sebagai upaya untuk mencegah berlanjutnya krisis ekologi, dewasa ini telah dikembangkan sistem peralatan berteknologi tinggi yang mampu menjinakkan gas-gas seperti SO_x dan NO_x dalam gas buang yang dikeluarkan oleh cerobong, baik dari stasiun pembangkit listrik maupun industri lain yang membakar batubara.

Salah satu peralatan berteknologi tinggi adalah electron beam machine atau Mesin Berkas Elektron (MBE). Prinsip kerja alat ini adalah menghasilkan berkas elektron dari filamen logam tungsten yang dipanaskan. Berkas elektron selanjutnya difokuskan dan dipercepat dalam tabung akselerator vakum bertegangan tinggi 2 juta Volt. Jika gas buang yang mengandung polutan sulfur dan nitrogen diirradiasi dengan berkas elektron dalam suatu tempat yang mengandung gas ammonia, sulfur dan nitrogen itu dapat berubah menjadi ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Teknik iradiasi elektron untuk membersihkan polutan dalam gas buang ini telah dipelajari di Jepang sejak tahun 1970-an.

Proses pembersihan gas buang dilakukan pertama-tama dengan mendinginkan SO_x dan NO_x dengan semburan air (H₂O). Ke dalam campuran senyawa ini selanjutnya ditambahkan gas ammonia dan dialirkan ke dalam tabung pereaksi (vessel). Campuran senyawa yang mengalir dalam

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri



gambar 89.
Grafik proses
penjinakan
polutan SOx dan
NOx dalam gas
buang
(sumber : JAERI,
Japan)

tabung pereaksi ini selanjutnya diirradiasi dengan berkas elektron. Karena mendapatkan tambahan energi dari elektron itu, maka gas-gas polutan akan berubah, SO_x menjadi SO_3 dan NO_x menjadi NO_3^- . Masih dalam pengaruh irradiasi elektron, kedua senyawa tersebut bereaksi dengan air, sehingga dihasilkan produk antara (*intermediate product*) berupa asam sulfat dan asam nitrat seperti ditunjukkan pada grafik proses penjinakan polutan.

Pada grafik terlihat bahwa kadar SO_x dan NO_x langsung berkurang secara drastis, sementara itu kadar gas ammonia tidak berubah. Setelah 0,1 detik dari proses irradiasi, produk antara (asam sulfat dan asam nitrat) bereaksi dengan ammonia sehingga dihasilkan produk akhir berupa ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Kedua senyawa ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pupuk sulfat dan pupuk nitrogen. Wujud fisiknya pun berubah, yaitu dari gas menjadi kristal/partikel. Pada grafik terlihat bahwa kadar ammonia dan produk antara turun drastis, sementara itu produk akhirnya meningkat.

Uji Coba Mesin Berkas Elektron

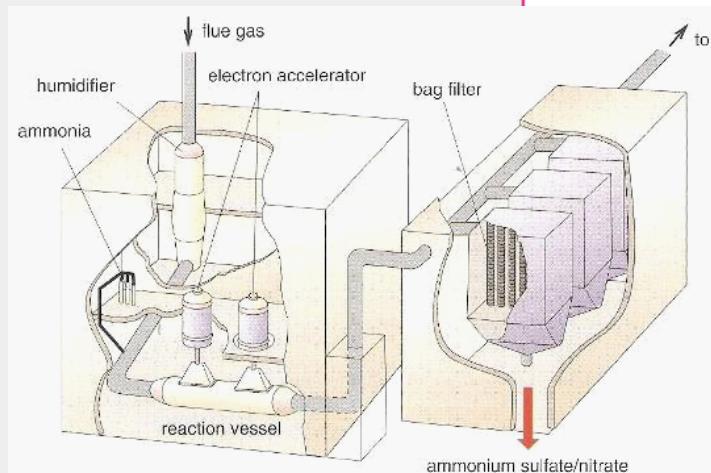
Saat ini, studi engineering maupun studi kelayakan untuk memanfaatkan teknik irradiasi berkas elektron telah dilakukan dalam bentuk proyek percontohan melalui kerjasama antara Lembaga Penelitian Tenaga Atom Jepang atau *Japan Atomic Energy Agency* (JAERI) dan konsorsium perusahaan swasta yang bergerak dalam bidang engineering dan stasiun pembangkit listrik batubara. Penelitian skala laboratorium yang dilakukan oleh JAERI bekerjasama dengan perusahaan Ebara menunjukkan bahwa dosis radiasi berkas elektron sebesar 15 kilo Gray (kGy) mampu mengubah 95% SO_x dan 85% NO_x menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Sementara itu, penelitian

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

pembersihan gas buang sisa penyinteran bijih besi yang dilakukan oleh *Nippon Steel Corporation* menunjukkan bahwa MBE ini dapat mereduksi 85% SO_x dan 95% NO_x yang terlarut dalam gas buang. Penelitian yang telah dilakukan di AS dan Jerman bahkan mencatat bahwa irradiasi dengan MBE ini mampu mereduksi polutan hingga 99%. Beberapa hasil penelitian tadi menunjukkan bahwa teknologi MBE mempunyai prospek masa depan yang sangat baik.

Penelitian dan kerjasama internasional yang didukung oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), JAERI dan Institut Kimia Nuklir dan Teknologi Polandia (INCT) telah berhasil mengembangkan fasilitas berkas elektron untuk pengolahan gas buang yang dilepaskan oleh stasiun pembangkit listrik batubara. Proyek percontohan itu dilengkapi dengan dua buah akselerator elektron dan ditempatkan di *Kaweczyn Electric Power Station* di Polandia. Berdasarkan penelitian yang diperoleh dari kerjasama tersebut, proyek demonstrasi skala industri untuk penjinakan limbah dengan kapasitas $2,7 \times 10^5$ Nm³/jam (setara dengan jumlah gas buang setiap jam yang dilepaskan dari stasiun pembangkit listrik batubara berdaya 56 MW) saat ini telah dibangun di *Pomorzany Thermolectric Power Station*, juga di Polandia. Proyek yang mendapat dukungan dari IAEA dan Pemerintah Jepang tersebut pada saat itu direncanakan mulai beroperasi tahun 1999.

Pemakaian berkas elektron untuk menjinakkan gas-gas polutan seperti SO_x dan NO_x ini mempunyai beberapa keuntungan, antara lain : proses penjinakan dapat dilakukan secara serentak dalam waktu yang sangat singkat, merupakan proses kering dan langsung satu tingkat, serta hasil akhirnya berupa bahan baku untuk pembuatan pupuk yang bernilai ekonomi dan dapat digunakan dalam sektor pertanian. Teknologi ini juga



gambar 90.
Penampang
fasilitas MBE di
Kaweczyn Electric
Power Station
Polandia
(sumber : JAERI,
Japan)

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

dinilai sangat praktis dan aman, baik terhadap lingkungan maupun personil yang terlibat dalam pengoperasian MBE. Berkas elektron yang dipancarkan tidak dapat melakukan reaksi aktivasi sehingga tidak akan menghasilkan limbah radioaktif, dan berkas elektron tidak akan terpancar pada saat mesin dimatikan.

Selain memiliki beberapa keuntungan seperti tersebut di atas, teknologi berkas elektron ini dinilai cukup murah. Untuk membangun stasiun pembangkit listrik batubara berdaya 1200 Mega Watt memerlukan investasi di atas US\$ 1 miliar, sedang untuk membangun instalasi penjinak gas buang menggunakan MBE ini hanya memerlukan biaya antara US\$ 2-3 juta.

4.5 Modifikasi Bahan

Teknik nuklir dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas produk menggunakan teknologi irradiasi. Tanpa disadari sebetulnya banyak produk-produk industri yang dipakai dalam kehidupan sehari-hari mengandung komponen yang proses pembuatannya melibatkan teknologi irradiasi. Barang-barang dari plastik untuk keperluan rumah tangga dapat dibuat melalui proses polimerisasi radiasi. Produk berupa pesawat televisi maupun mobil mengandung kabel yang pembungkusnya diperkuat oleh proses irradiasi. Lapisan permukaan tipis pada baterai jam digital atau kalkulator, demikian juga *floppy disc* dan *video tape* diproses menggunakan teknologi irradiasi.

Penggunaan teknologi irradiasi yang cukup besar adalah dalam proses kimia suatu industri. Karena membawa energi yang cukup tinggi, radiasi dapat bertindak sebagai katalis untuk merangsang terjadinya perubahan kimia suatu bahan, salah satunya adalah untuk merubah bahan kimia sejenis cairan dari senyawa organik dalam golongan monomer menjadi polimer. Salah satu sifat dari monomer ini adalah apabila menerima paparan radiasi dapat berubah menjadi bahan baru yang disebut polimer, yaitu bahan padat yang sangat keras pada suhu kamar. Dalam bidang industri, teknologi irradiasi dapat dipakai untuk memproduksi plastik bermutu tinggi karena sifatnya yang sangat kuat serta tahan terhadap panas. Polimerisasi merupakan reaksi kimia yang menggabungkan dua molekul atau lebih menjadi molekul yang lebih besar. Secara umum dapat dikatakan

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

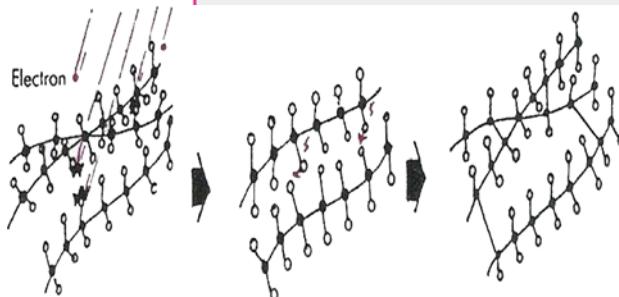
bahwa polimerisasi merupakan usaha untuk memadukan beberapa unsur menjadi satu zat yang berpadu. Teknik polimerisasi radiasi merupakan salah satu dari pemanfaatan radiasi untuk memodifikasi polimer. Tujuannya adalah mengolah bahan mentah yang berasal dari alam maupun sintesanya, seperti polietilen dan polipropilen, menjadi bahan setengah jadi atau bahan jadi.

Polimer dibuat dari bahan yang disebut monomer, yaitu sejenis gas maupun cairan dengan molekul tunggal yang saling terpisah. Apabila mendapatkan energi dari radiasi, monomer ini akan saling berikatan membentuk molekul raksasa yang lebih kompleks yang disebut polimer. Senyawa inilah yang selanjutnya dijadikan sebagai bahan dasar untuk pembuatan plastik. Selain untuk membuat polimer, teknologi irradiasi juga dapat dipakai untuk memodifikasi sifat polimer tersebut. Modifikasi polimer ini merupakan suatu upaya untuk memperbaiki sifat-sifat polimer sehingga menjadi polimer baru dengan mutu yang lebih baik. Sebagai contoh adalah polimer polietilen yang biasa dikenal sebagai salah satu termoplastik dan sering digunakan untuk bahan pembungkus, ternyata dapat dimodifikasi lebih lanjut sehingga dapat dipakai sebagai bahan isolasi kabel yang tahan terhadap panas.

Isu lingkungan yang gencar belakangan ini telah memaksa industri untuk mengkaji ulang terhadap bahan-bahan yang digunakan dalam proses produksi, terutama yang berbahan baku plastik yang tidak dapat didegradasi oleh alam. Berbeda dengan teknik polimerisasi konvensional yang umumnya menggunakan bahan kimia dan panas agar terjadi reaksi penggabungan. Pada polimerisasi radiasi ini, penggunaan bahan kimia dan panas sangat sedikit, sehingga secara ekonomi prosesnya lebih menguntungkan, di samping teknologinya sendiri dinilai bersih dari pencemaran lingkungan, tidak menggunakan bahan-bahan kimia karsinogenik (bahan yang dapat merangsang tumbuhnya kanker dalam tubuh) serta bahan beracun lainnya. Di samping itu, pembuatan polimer dengan radiasi ini dapat dilakukan dalam berbagai kondisi dan dapat dikontrol dengan teliti.

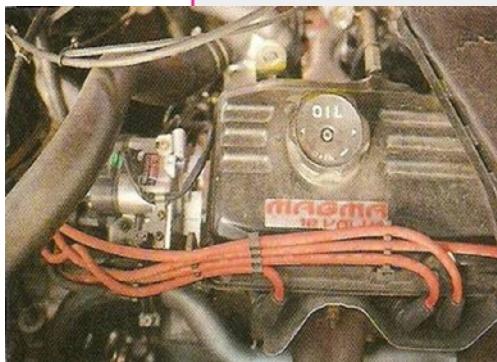
Peralatan berteknologi tinggi yang dipakai untuk polimerisasi radiasi adalah Mesin Berkas Elektron (MBE). Di negara maju, teknologi irradiasi ini sudah diterapkan dalam berbagai kegiatan industri, sehingga banyak sekali produk bermutu tinggi yang telah dihasilkan oleh industri yang memanfaatkan teknologi irradiasi ini.

Kabel tidak pernah dapat dipisahkan dari listrik. Hampir pada setiap barang elektronik dapat kita jumpai kabel di dalamnya. Secara umum, kabel yang kita



gambar 91.
Proses terjadinya
ikatan silang
pada polimer

gambar 92.
Kabel tahan
panas banyak
dimanfaatkan
untuk mesin
mobil



kimia lainnya. Kelebihan ini dapat dicapai tanpa menyebabkan perubahan sifat kelistrikan maupun daya isolasinya.

kenal biasanya terdiri atas satu atau lebih logam konduktor (logam yang sangat baik dalam menghantarkan arus listrik) yang dibungkus dengan bahan isolator (bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik). Kabel jenis ini sering kita temui baik untuk transmisi arus listrik maupun pengiriman pulsa listrik dalam telekomunikasi. Kita juga dapat menjumpai jenis kabel untuk

pembakaran, seperti dalam mesin mobil.

Isolasi kabel listrik umumnya dibuat dari bahan plastik polietilen atau *polivinil chlorida* (PVC). Kedua polimer ini merupakan jenis linier, yaitu polimer yang melunak atau leleh apabila dipanaskan. Kelemahan bahan isolasi ini tentu tidak diinginkan untuk kabel yang digunakan pada alat atau instalasi tertentu. Kabel untuk mesin mobil misalnya, karena berada di lingkungan yang panas, harus tahan dan tidak rusak karena pengaruh panas dari mesin. Pemanfaatan polimer hasil iradiasi dalam industri yang paling banyak adalah untuk pembuatan bahan isolasi kabel listrik. Irradiasi menyebabkan rantai molekul panjang pada polimer bergandengan pada tempat-tempat tertentu yang prosesnya dikenal sebagai pengikatan silang (*crosslinking*). Energi radiasi dapat merangsang terjadinya ikatan silang antar polimer sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi yang dapat mengubah sifat polimer. Peristiwa inilah yang sebenarnya menyebabkan bahan isolasi kabel lebih tahan terhadap panas dan listrik tegangan tinggi.

Plastik PVC yang dibuat dari bahan polimer hasil iradiasi dapat mempertahankan kepadatannya pada temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan plastik PVC biasa (hasil proses kimia). Dengan teknologi iradiasi ini, bahan isolasi kabel menjadi lebih kuat, lebih elastis, dan lebih tahan terhadap minyak serta larutan

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

Teknologi irradiasi juga dapat memodifikasi polietilen menjadi produk polimer yang dapat menyusut volumenya apabila diberi perlakuan panas yang sering disebut sebagai heat shrinkable tube. Produk ini banyak digunakan dalam industri listrik untuk mengisolasi sambungan-sambungan listrik. Heat shrinkable tube juga sering digunakan dalam industri telekomunikasi untuk membungkus satuan-satuan kabel seperti satuan kabel telepon, agar terlindung dari pengaruh luar, lebih awet, aman serta dapat ditanam di bawah tanah. Teknologi irradiasi sangat efisien dan ekonomis untuk memproduksi bahan isolasi kabel berdiameter kecil yang sangat banyak dipakai dalam industri elektronika yang memerlukan akurasi tinggi, seperti komputer dan pesawat telekomunikasi.

Kabel dengan isolasi polimer hasil proses irradiasi telah berada di pasaran dan ternyata memiliki nilai komersial karena bermutu tinggi. Untuk beberapa jenis produk barang elektronik, penggunaan kabel bermutu tinggi ini seringkali menjadi syarat mutlak, sehingga produk yang dihasilkannya benar-benar dapat diandalkan dan berdaya saing.

4.6

Penanggalan Radiokarbon

Salah satu metode yang sering dimanfaatkan untuk penentuan usia bangunan maupun temuan benda kuno dalam bidang arkheologi adalah penanggalan radiokarbon (*radiocarbon dating*). Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Willard F. Libby pada tahun 1940 di *Institute for Nuclear Studies*, Universitas California. Penanggalan radiocarbon bertumpu pada peluruhan unsur radioaktif alam C-14. Karena dapat memberikan hasil yang sangat memuaskan, metode itu hingga saat ini masih tetap digunakan secara luas untuk penanggalan temuan-temuan arkheologi.

Jumlah radionuklida kosmogenik C-14 dalam tubuh makhluk hidup (manusia, hewan serta tumbuh-tumbuhan) selalu tetap, karena disamping terjadi pemasukan juga terjadi pengeluaran maupun peluruhan secara kontinyu. Namun setelah kematian makhluk hidup, pemasukan C-14 ke dalam tubuhnya tidak terjadi lagi. Dilain pihak, karena C-14 ini bersifat radioaktif, maka radionuklida tersebut akan melakukan peluruhan sehingga

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

gambar 93. Bangunan kuno Stone Henge di Wiltshire, Inggris, diperkirakan berusia 4.000 tahun berdasarkan hasil analisis kandungan C-14 dalam arang kayu siswa pengapian yang ditemukan di salah satu bagian bangunan tersebut

jumlahnya terus berkurang secara eksponensial oleh waktu. Apabila pada suatu saat jasad makhluk hidup tersebut ditemukan dalam bentuk fosil, usia dari fosil dapat diketahui melalui pengukuran kadar C-14 yang masih tertinggal di dalam fosil tersebut.

Peluruhan merupakan peristiwa yang terjadi di dalam inti atom, sehingga tidak terpengaruh oleh faktor-faktor fisika dan kimia di sekelilingnya, seperti perubahan suhu, tekanan udara, kelembaban dan sebagainya.

Radionuklida C-14 memiliki waktu paro 5.730 tahun. Waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh suatu radionuklida untuk meluruh menjadi setengah dari jumlah semula. Jadi seandainya ada 1.000 atom C-14 pada suatu saat, maka jumlahnya akan berkurang menjadi 500 buah (setengah dari 1.000) setelah 5.730 tahun kemudian, jumlahnya akan berkurang menjadi 250 buah (setengah dari 500) pada 5.730 tahun berikutnya, demikian seterusnya.



Dengan membandingkan kadar C-14 dalam sampel organisme sejenis yang masih hidup, jumlah C-14 yang sudah meluruh dalam sampel arkheologi dapat diketahui. Dengan mengetahui jumlah C-14 yang sudah meluruh inilah, bisa ditentukan kapan organisme itu mati. Banyak temuan arkheologi yang dapat didata menggunakan penanggalan radiokarbon, seperti semua jenis fosil (tumbuhan, hewan maupun manusia), arang siswa pengapian, tanah gambut, potongan kain, kulit, kerang, tanduk, tulang, bulu binatang, rambut, lumut serta bahan-bahan organik lainnya. Penanggalan fosil (tengkorak, kerangka

manusia maupun binatang) dapat pula didata secara tidak langsung, yaitu melalui penanggalan arang maupun bahan organik lainnya yang ditemukan pada lapisan di mana fosil itu ditemukan. Melalui teknik ini, penanggalan fosil dapat dilakukan tanpa merusak fosil itu sendiri.

Pemanfaatan

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

Penanggalan radiokarbon telah digunakan di beberapa negara untuk mendata usia temuan-temuan arkheologi. Di Amerika Serikat, penanggalan ini dipakai untuk menentukan usia benda arkheologi berupa 300 pasang sandal bertali dan ditenun yang ditemukan dalam gua yang dikenal sebagai *Fort Rock Cave* di Oregon. Hasil pendataan sampel organik dalam sandal menunjukkan bahwa benda tersebut dibuat sekitar 9.000 tahun lalu.

Masih di AS, penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk memperkirakan saat terbentuknya Danau Kawah di Oregon. Danau itu muncul karena adanya letusan gunung berapi kuno yang menghancurkan puncak gunung sehingga reruntuhan dan lahar panasnya mengubur seluruh kawasan dan membakar atau menghanguskan hutan-hutan di sekitarnya. Sampel yang dipakai untuk penyelidikan ini adalah arang dari suatu pohon yang hangus oleh lahar panas. Hasil pengukuran kadar C-14 dalam arang tersebut menunjukkan bahwa Danau Kawah di Oregon tadi terbentuk kira-kira 6.400 tahun lalu.

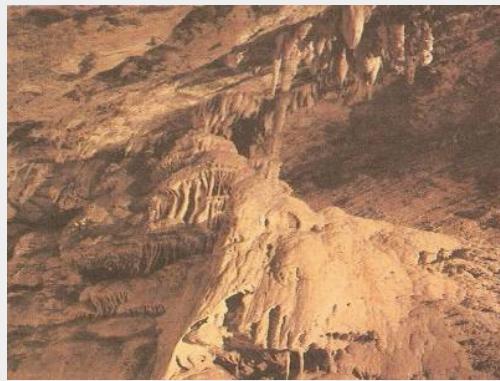
Di Mesir yang kaya dengan peninggalan benda-benda arkheologi, penanggalan radiokarbon dengan sukses digunakan untuk menentukan usia kayu dari dek kapal keranda agung dari makam raja Sesostris III. Perahu itu kini berada di Museum Sejarah Alam di Chicago, AS. Perahu dengan panjang kira-kira 3,5 meter dan lebarnya 2 meter itu diketahui sudah berumur sekitar 3.600 tahun. Masih di Mesir, penanggalan radiokarbon digunakan untuk mengetahui usia kepingan balok kayu akasia dari makam Zoser di Sakkara yang diawetkan dengan cermat. Makam itu diperkirakan telah berumur 4.650 tahun. Butiran gandum dan jawawut yang ditemukan dalam lumbung di provinsi Faiyun didata dengan penanggalan radiokarbon sehingga diketahui usianya sekitar 6.000 tahun.

Penanggalan radiocarbon juga dapat dilakukan melalui pengukuran C-14 dalam arang sisa pengapian manusia purba. Metode ini telah digunakan di Perancis untuk mengetahui usia lukisan peninggalan manusia purba di gua *Lascaux*, di departemen Dordogne. Di dalam gua itu sangat terkenal akan lukisan berwarnanya yang terdiri atas lukisan hewan dari zaman batu. Melalui pengukuran C-14 dalam arang sisa pengapian manusia purba yang di temukan di dalam gua tersebut, diketahui bahwa lukisan dalam gua Lascaux dibuat kira-kira 15.000 tahun silam.

Dengan metode yang sama seperti di Perancis, sampel arang yang ditemukan

Bab 4 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Industri

gambar 93. Penanggalan radiokarbon dapat dipakai untuk mempelajari proses pembentukan stalagtit dan stalagmit yang terbentuk di dalam gua-gua gunung kapur (sumber : Ilmu Pengetahuan Populer)



di monumen batu terkenal Stone Henge di Wiltshire, Inggris, dipakai untuk menentukan usia bangunan tersebut. Lubang yang berada di luar lingkaran pada bongkahan batu yang besar itu diperkirakan digunakan sebagai sarana upacara keagamaan. Sampel arang ditemukan pada salah satu lubang Stone Henge. Pengukuran

C-14 dalam arang menunjukkan bahwa bangunan tersebut telah berumur hampir 4.000 tahun. Panggung Birchwood dari pemukiman manusia purba di danau Pickering di Yorkshire, juga di Inggris, telah didata menggunakan penanggalan radiocarbon dan diketahui telah berumur sekitar 9.500 tahun.

Bab 5 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Hidrologi

Radioisotop dapat pula dimanfaatkan sebagai perunut dalam studi hidrologi. Dengan perunut radioisotop ini, berbagai masalah dalam bidang hidrologi dapat dipecahkan dengan cara langsung yang lebih cepat. Dalam bidang ini, teknik perunutan dilakukan dengan cara memantau radiasi yang dipancarkan oleh perunut radioisotop, atau dalam kegiatan ini lebih sering dikenal dengan sebutan *radiotracer*. Dalam studi hidrologi, *radiotracer* yang digunakan dilepaskan langsung ke lingkungan. Oleh sebab itu, radioisotop yang digunkannya harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu :

1. Tidak berbahaya terhadap manusia dan makhluk hidup di sekelilingnya.
2. Jumlah radioisotop yang dilepaskan ke lingkungan diperhitungkan sedemikian rupa sehingga tidak terjadi pelepasan dalam jumlah yang berlebihan.
3. Radioisotop yang digunakan harus dapat larut dalam air.
4. Radioisotop tidak akan diserap oleh tanah, tanaman maupun organisme hidup lainnya.

Peranan *radiotracer* sebagai perunut dalam hidrologi telah terbukti banyak sekali memberikan manfaat dan dapat dipakai sebagai pendukung metode non-nuklir lainnya yang telah ada. Meskipun tidak semua persoalan hidrologi dapat diselesaikan dengan teknik nuklir ini, namun penggunaan *radiotracer* seringkali merupakan satu-satunya metode yang dapat menyelesaikan persoalan. Dalam bidang hidrologi, *radiotracer* tersebut dapat digunakan sebagai perunut dalam berbagai kegiatan. Berikut ini dikemukakan beberapa contoh aplikasi teknik nuklir dalam bidang hidrologi.

gambar 94.
Debit air sungai
dapat diukur
dengan teknik
pengenceran
radiotracer
(sumber :
Indonesia
Untaan
Manikam di
Khatulistiwa)



5.1

Pengukuran Debit Air Sungai

Metode dasar dalam pengukuran debit air sungai adalah pengenceran *radiotracer*. *Radiotracer* dalam jumlah tertentu yang tidak berbahaya dilepas dibagian hulu sungai dan diukur konsentrasi di bagian hilir. Besarnya perubahan kadar perunut karena terjadinya pengenceran oleh aliran (debit) air sungai dapat diketahui dengan cara mencacah langsung intensitas radiasi dalam air sungai

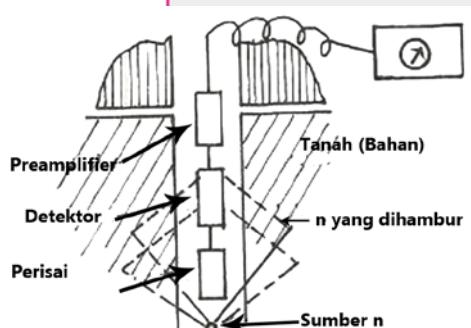
tersebut. Penggunaan *radiotracer* untuk mengukur debit air sungai terbukti lebih sederhana dibandingkan metode pengukuran menggunakan *current meter*. Kelebihan lainnya adalah pengukurannya dapat dilakukan lebih cepat dan dapat dilakukan pada saat sungai sedang banjir. Pengukuran debit air sungai antara 300-600 m³ per detik hanya membutuhkan waktu kurang lebih satu jam. Makin turbulen arus air sungai, makin cepat dan makin baik hasil pengukurannya.

5.2 Penentuan Arah Gerak Air Tanah

Data gerakan air tanah pada suatu wilayah merupakan data yang sangat penting untuk berbagai keperluan, antara lain dalam kaitannya dengan pembangunan suatu bendungan, penentuan tempat penyimpanan limbah berbahaya dan sebagainya. Air tanah selalu bergerak sesuai dengan kondisi geologinya. Untuk mengetahui pergerakan air tanah ini dapat digunakan metode sumur banyak. Dalam hal ini *radiotracer* diinjeksikan ke dalam sumur yang berada di tengah-tengah sehingga *radiotracer* tersebut larut dan bercampur dengan air tanah. *Radiotracer* selanjutnya akan terbawa ke mana-mana mengikuti arah aliran air tanah.

Dengan mencacah air tanah dari sumur-sumur lain yang ada di sekelilingnya, maka arah gerakan air tanah di tempat tersebut dapat ditentukan, yaitu dengan cara mengetahui adanya *radiotracer* yang terlarut dalam air. Dalam hal ini *radiotracer* hanya akan ditemukan pada air tanah dari sumur-sumur tertentu, yang berarti arah aliran air tanah itu menuju ke sumur dimana dalam air tanahnya ditemukan *radiotracer* yang sebelumnya diinjeksikan. Teknik pernut ini juga dapat digunakan untuk mengetahui kecepatan alir air tanah dan permeabilitasnya.

gambar 95.
Teknik pengukuran kadar air tanah dengan teknik hamburan neutron
(sumber : BATAN)



5.3 Penentuan Kadar Air Tanah

Banyak alat-alat konvensional yang dirancang khusus untuk mengukur kadar air, namun jarang yang dapat melakukan pengukuran dengan

Bab 5 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Hidrologi

teliti, cepat, dilakukan di tempat, tidak merusak dan alatnya dapat dibawa-bawa (*portable*). Pengukuran kadar air dengan neutron ternyata mampu memenuhi semua kriteria tersebut. Dengan berbagai keuntungan teknis ini, maka pengukuran kadar air dengan neutron banyak digunakan para ahli dalam bidang teknik sipil, agronomi dan hidrologi untuk pengukuran kadar air dalam tanah, kepadatan tanah, aspal dan beton. Data hasil pengukuran itu digunakan untuk merancang pondasi bangunan, jalan raya, pembuatan tanggul dan lain sebagainya. Sedang dalam bidang industri dan laboratorium digunakan untuk pengukuran berbagai hasil akhir dan penelitian.

Karena kesederhanaannya, alat pengukur kadar air dengan neutron ini banyak diminati oleh berbagai fihak. Alat ini mempunyai sumber neutron cepat. Adapun proses kerjanya adalah memanfaatkan hasil tumbukan antara neutron cepat dengan atom hidrogen yang terdapat dalam molekul air dalam materi yang diukur. Dari hasil tumbukan ini akan dihasilkan neutron termik. Jumlah neutron termik yang terbentuk akan ditangkap oleh pemantau neutron. Hasil cacahan neutron akan sebanding dengan jumlah air yang terkandung di dalam bahan.

5.4

Penentuan Gerakan Sedimen

Proses pendangkalan pelabuhan merupakan proses alamiah yang tidak bisa dicegah. Pada pelabuhan dangkal, kapal-kapal besar tidak akan dapat merapat ke dermaga, sehingga bongkar muat barang dapat terganggu. Sedang untuk pengeringan endapan diperlukan biaya yang sangat besar. Oleh sebab itu, pendangkalan pada suatu pelabuhan dan alur pelayaran merupakan masalah yang sangat serius karena menyangkut kelangsungan pelayaran perhubungan laut.



gambar 96.
Mempelajari arah
gerak sedimen
dengan perunt
radioisotop
(sumber : IAEA)

Salah satu usaha yang dapat ditempuh untuk memperkecil kecepatan pendangkalan pelabuhan maupun alur pelayaran oleh sedimen adalah dengan mengetahui perilaku sedimen, yaitu menentukan dari mana asal dan kemana arah gerakan sedimen tersebut. Data mengenai arah pergerakan sedimen dapat digunakan untuk perencanaan penentuan posisi dan arah

Bab 5 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Hidrologi

alur pelayaran serta menentukan tempat untuk pembuangan endapan hasil pengerukan agar tidak kembali ke tempat semula. Semua usaha ini akan dapat mengurangi laju pendangkalan sehingga frekwensi pengerukan bisa dikurangi dan biaya untuk pengerukan bisa dihemat.

Teknik pelaksanaan penentuan arah gerakan sedimen dilakukan dengan menandai sedimen yang diambil di pelabuhan dengan radioisotop seperti Kromoium-51(Cr -51), Aurum -198 (Au-198) dan Skandium-46 (Sc-46) atau membuat endapan tiruan yang bersifat radioaktif seperti pelapisan lumpur dengan zat radioaktif atau pasir tiruan yang diaktifkan (pasir ini dibuat dari gelas yang mengandung radioisotop Iridium-192 (Ir- 192) dan Sc- 46). Sedimen radioaktif tersebut selanjutnya dilepaskan ke dasar laut di daerah yang diselidiki. Endapan radioaktif ini akan mengikuti gerak endapan asli.

Metode ini dapat digunakan untuk mempelajari arah, kecepatan dan penyebaran lumpur ataupun pasir yang berperan dalam proses pendangkalan pelabuhan. Pengamatan tersebut dapat dilakukan menggunakan pemantau radiasi dari permukaan laut atau di atas kapal. Selain itu, studi ini juga dapat dipakai untuk mengetahui efisiensi transpot sedimen dan erosi.

5.5

Penentuan Kebocoran Bendungan

Metode peruntun radioisotop juga dapat dipakai untuk menentukan letak kebocoran atau rembesan suatu bendungan/dam. Teknik penentuannya dilakukan dengan cara melepaskan radioisotop pada tempat tertentu di reservoar (air dam) yang dicurigai sebagai tempat rembesan tersebut berasal. Radioisotop akan larut dan bercampur dengan air sehingga apabila terjadi kebocoran pada bendungan, air yang telah bercampur dengan radioisotop akan masuk dan bergerak mengikuti arah perembesan. Dengan melakukan pengukuran tingkat radioaktivitas air yang keluar melalui mata air maupun sumur-sumur pengamatan di daerah rembesan, maka adanya rembesan beserta arahnya dapat diketahui.

5.6

Penentuan Laju Erosi

Bab 5 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Hidrologi

Peristiwa erosi dapat disebabkan baik oleh angin maupun air. Namun sebagian besar kasus erosi tanah umumnya disebabkan oleh air hujan. Dengan menandai tanah yang dipelajari dengan radioisotop, maka laju erosi tanah oleh air hujan dapat dipelajari dengan teliti. Setelah terkena air hujan, aktivitas radioisotop dalam tanah akan berkurang. Dengan cara membandingkan aktivitas radioisotop dalam tanah antara sebelum dan setelah terkena air hujan, maka laju erosi tanah dapat diketahui.

5.7

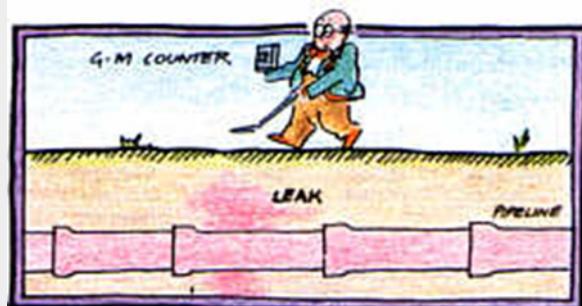
Deteksi Kebocoran Dan Sumbatan Pipa Bawah Tanah

Mencari kebocoran dan sumbatan pipa di bawah tanah merupakan pekerjaan besar dan tidak sederhana. Dengan teknik perunut radioisotop, pekerjaan yang membutuhkan tenaga besar tersebut ternyata dapat disederhanakan. Pemeriksaan kebocoran pipa di bawah tanah dengan perunut radioisotop dapat dilakukan langsung dari permukaan tanah di atas pipa, tanpa perlu dilakukan penggalian. Metode pemeriksaan yang dilakukan adalah dengan menginjeksikan perunut radioisotop ke dalam aliran.

Pergerakan radioisotop tersebut di dalam pipa dapat diikuti dari atas tanah menggunakan pemantau radiasi. Tempat yang memberikan hasil cacahan radiasi yang tinggi mengindikasikan telah terjadi kebocoran di tempat tersebut. Untuk menentukan letak sumbatan dalam pipa, sebuah *polipig* berisi radioisotop dimasukkan ke dalam pipa. Arah pergerakan polipig tersebut dapat diikuti dengan pemantau radiasi dari luar pipa. *Polipig* akan berhenti di tempat terjadinya sumbatan.

Aplikasi teknik nuklir dalam bidang kesehatan telah memberikan sumbangan yang sangat berharga dalam mendukung diagnosis maupun terapi berbagai jenis penyakit. Selain itu, teknik nuklir berperan pula dalam kajian dan penelitian untuk lebih memahami proses fisiologi dan patofisiologi dari kelainan pada tingkat molekuler dan seluler yang terjadi

gambar 97.
Deteksi
kebocoran pipa
bawah tanah
(sumber :



Bab 5 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Hidrologi

pada berbagai organ tubuh manusia. Berbagai disiplin ilmu kedokteran seperti ilmu penyakit dalam, ilmu penyakit syaraf, ilmu penyakit jantung, dan lainnya telah memanfaatkan teknik nuklir ini.

Radiasi pengion baik dengan sumber terbuka atau tertutup dimanfaatkan dalam radiodiagnostik untuk memperoleh gambaran atau citra berdasarkan energi radiasi yang dipancarkannya sehingga diperoleh informasi tentang suatu kondisi atau penyakit dalam tubuh. Sedangkan dalam radioterapi, radiasi dimanfaatkan untuk mengobati atau mengontrol penyakit malignansi berdasarkan sifat toksitas radiasi yang dapat mematikan sel. Aplikasi teknik nuklir dalam bidang kesehatan juga telah diterapkan secara luas dalam proses sterilisasi produk dan peralatan kesehatan.

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

6.1

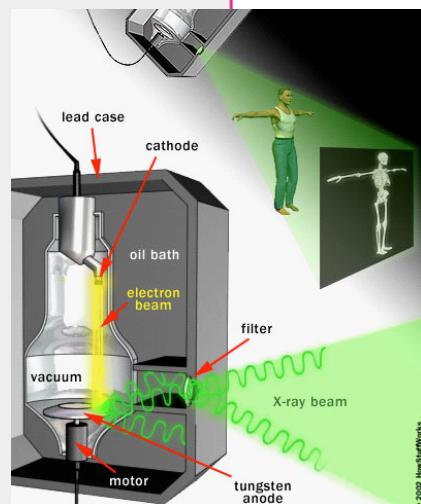
Radiodiagnostik

Tindakan radiodiagnostik bertujuan untuk mendeteksi adanya kelainan/kerusakan pada organ dan kanker pada tubuh dengan menggunakan pesawat sinar-X energi rendah dengan hasil dalam bentuk citra anatomi. Dosis radiasi yang digunakan dalam radiodiagnostik tidak berbahaya bagi pasien pada interval waktu tertentu karena relatif setara dengan dosis radiasi alam dan jauh lebih rendah dari dosis yang digunakan dalam radioterapi.

Jika sebuah film ditempatkan pada bayangan seorang pasien, film tersebut akan menghasilkan citra dari bagian dalam tubuh pasien misalnya tulang akan tampak terang pada film. Jika seseorang perlu memeriksa kondisi organ dalam tubuhnya misalnya usus atau ginjal, maka pasien tersebut harus menggunakan medium kontras baik dengan cara diminum atau disuntik. Medium tersebut akan menuju organ target dan memberikan citra organ yang jelas pada gambar sinar-X. Pemeriksaan dada dengan sinar-X dapat mengungkapkan penyakit misalnya *tuberculosis* dan penyakit paru lainnya pada tahap awal sehingga dapat diberikan pengobatan segera.

Beberapa metode radiodiagnostik lain yang menggunakan pada teknologi sinar-X adalah *mammography* untuk mendeteksi keberadaan kanker payudara, fluoroskopi (X-ray "movie") untuk mengamati citra sinar-X dari tubuh pasien melalui monitor secara langsung dan dinamik dengan paparan sinar-X secara kontinyu pada pasien, dan *Computed Tomography* (CT) Scan. Pencitraan dengan pesawat CT-scan memberikan gambaran tentang sifat morfologik berdasarkan perubahan atau perbedaan transmisi radiasi melalui organ atau bagian tubuh yang diperiksa.

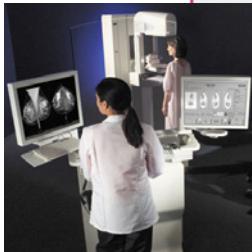
gambar 98.
X-ray



gambar 99.
CT Scan

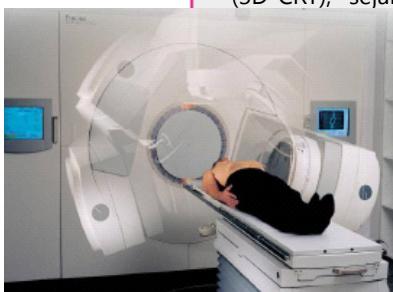


ADAM.



gambar 100.
Alat
mammography
beserta
mammogram
yang
menunjukkan
adanya lesi/
kanker payudara

gambar 101.
Pesawat
Teleterapi
dengan posisi
sumber Co-60
yang dapat
diatur posisinya



6.2 Radioditerapi

Radioterapi adalah tindakan medis menggunakan radiasi pengion untuk mematikan sel kanker sebanyak mungkin dengan kerusakan pada sel normal sekecil mungkin. Tindakan terapi ini menggunakan sumber radiasi tertutup pemancar sinar gamma atau pesawat sinar-X dan berkas elektron. Terdapat dua teknik dalam radioterapi yaitu teleterapi (sumber eksternal) dan brakiterapi (sumber internal). Pada tindakan teleterapi, posisi sumber sinar gamma energi tinggi yang berasal dari Kobalt-60 (Co-60) yang disimpan dalam kontainer metal yang tebal pada alat, dapat diatur sedemikian rupa sehingga kanker dapat diradiasi dari berbagai arah yang ditujukan setepat mungkin pada jaringan tumor.

Tumor ganas dikenai radiasi yang sangat kuat secara berulang-ulang selama jangka waktu beberapa minggu. Radioterapi diberikan setiap hari dari berbagai arah secara tepat pada kanker. Dengan demikian kanker akan menerima radiasi dosis tinggi sementara jaringan normal dan sehat di sekitar lokasi kanker hanya akan menerima dosis yang lebih rendah dengan tingkat kerusakan yang dapat ditoleransi tubuh dan berangsur pulih.

Perkembangan teknik elektronika dan peralatan komputer canggih dalam dua dekade ini telah membawa perkembangan pesat dalam teknologi radioterapi. Dengan menggunakan pesawat LINAC (*linear accelerator*) generasi terakhir telah dimungkinkan untuk melakukan radioterapi kanker dengan keakuratan dan tingkat keselamatan yang tinggi melalui kemampuannya yang sangat selektif untuk membatasi hanya tumor yang akan dikenai radiasi dengan dosis yang tepat pada target. Dengan memanfaatkan teknologi *Three Dimensional Conformal Radiotherapy* (3D-CRT), sejak tahun 1985 telah berkembang metoda pembedahan dengan menggunakan radiasi pengion sebagai pisau bedahnya (*gamma knife*). Dengan teknik *radiosurgery* ini kasus tumor ganas yang sulit dijangkau dengan pisau bedah konvensional dapat diatasi dengan baik tanpa perlu membuka kulit pasien dan yang terpenting tanpa merusak jaringan normal di luar target.

Radioterapi dapat pula dilakukan dengan menggunakan

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

sumber radiasi terbuka yang diposisikan sedekat mungkin dengan kanker, dikenal sebagai tindakan brakiterapi. Sumber radiasi terbuka yang umum digunakan antara lain Iodium-125 (I-125), Radium-226 (Ra-226), Stronium-89 (Sr-89), Samarium-153 (Sm-153), dan Itrium-99 (Y-99). Sumber radiasi tersebut dikemas dalam bentuk jarum, biji sebesar beras, atau kawat dan dapat diletakkan dalam rongga tubuh (*intracavitary*) seperti kanker serviks, kanker paru, dan kanker esopagus, dalam organ/jaringan (*interstitial*) seperti kanker prostat, kanker kepala dan leher, kanker payudara, atau dalam lumen (*intraluminal*).

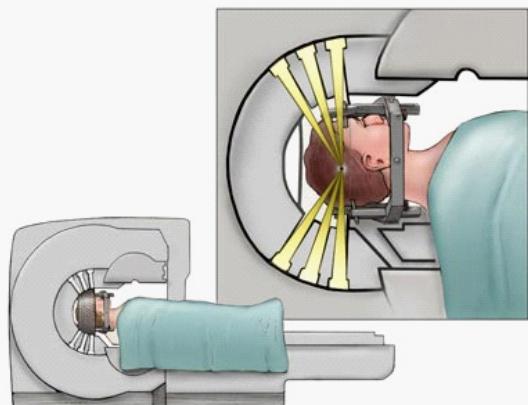
Radioterapi dapat pula digunakan untuk mengurangi rasa sakit pada pasien kanker yang disebut sebagai tindakan paliatif yang dapat dilakukan baik menggunakan sumber radiasi tertutup ataupun *linear accelerator*.

6.3

Kedokteran Nuklir

Kedokteran Nuklir adalah cabang ilmu kedokteran yang menggunakan sumber radiasi terbuka dari disintegrasi inti radionuklida buatan (radiofarmaka) untuk tujuan diagnostik, terapi dan paliatif dengan berdasarkan perubahan fisiologi, anatomi, biokimia, metabolisme dan molekuler dari suatu organ atau sistem dalam tubuh. Pada kedokteran nuklir, radioisotop dapat dimasukkan ke dalam tubuh pasien (*in vivo*) maupun hanya direaksikan saja dengan bahan biologis antara lain darah, cairan lambung, urin dan lainnya yang diambil dari tubuh pasien (*in vitro*). Dosis radiasi yang diterima oleh pasien setelah pemberian radiofarmaka ditentukan oleh sifat fisik radionuklida, metabolisme radiofarmaka dalam tubuh pasien, dan aktivitas yang diberikan. Tingkat radioaktivitas yang terdapat dalam tubuh pasien sedikit demi sedikit akan berkurang karena peluruhan fisik dan eliminasi biologik yang dialami oleh radiofarmaka.

gambar 102.
Gamma
knife untuk
radiosurgery



© Mayo Foundation for Medical Education and Research. All rights reserved.



gambar 103.
Biji I-125 yang
diletakkan dalam
kanker prostat
pada tindakan
brakiterapi

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

gambar 104.
Kamera Gamma



Gamma
camera



Pemeriksaan kedokteran nuklir banyak membantu dalam menunjang diagnostik berbagai penyakit seperti penyakit jantung koroner, penyakit kelenjar gondok, gangguan fungsi ginjal, menentukan tahapan penyakit kanker dengan mendeteksi penyebarannya pada tulang, mendeteksi pendarahan pada saluran pencernaan makanan dan menentukan lokasinya, serta masih banyak lagi yang dapat diperoleh dari diagnostik dengan penerapan teknologi nuklir yang pada saat ini berkembang pesat.

Radiofarmaka yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien melalui mulut, suntikan, atau dihirup lewat hidung, akan memberikan informasi berupa:

1. Citra organ atau bagian tubuh pasien yang diperoleh dengan bantuan alat kamera gamma atau kamera positron (teknik imaging) memberikan informasi fungsional berdasarkan pada perubahan biokimiawi-fisiologik yang menimbulkan pola emisi radiasi yang mencerminkan fungsi organ atau bagian tubuh yang diperiksa. Dapat pula dengan teknik *non-imaging in vivo* (renograf, tiroid uptake, heliprobe, dan lainnya).
2. Kurva hubungan aktivitas dan waktu yang menunjukkan kinetika radioisotop dalam organ atau bagian tubuh tertentu dan nilai yang menggambarkan akumulasi radioisotop dalam organ atau bagian tubuh tertentu, di samping citra atau gambar yang diperoleh dengan kamera gamma atau kamera positron
3. Radioaktivitas yang terdapat dalam sampel darah, urin, atau lainnya yang diambil dari tubuh pasien, dicacah dengan instrumen yang dirangkaikan pada detektor radiasi (teknik *non-imaging in vitro*).

Data yang diperoleh baik dengan teknik *imaging* maupun *non-imaging* memberikan informasi mengenai fungsi organ yang diperiksa. Pencitraan (*imaging*) pada kedokteran nuklir dalam beberapa hal berbeda dengan pencitraan dalam radiologi.

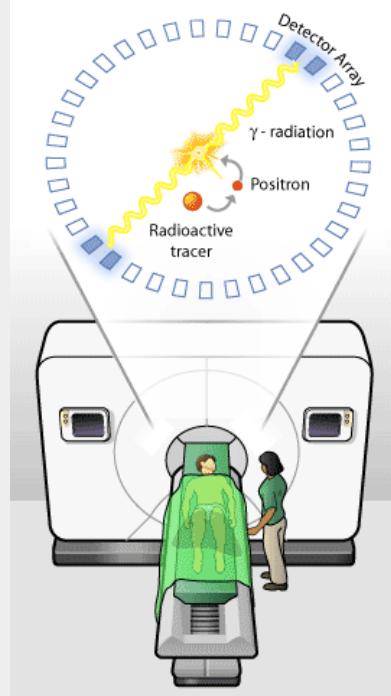
Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

Dua alat imaging yang sangat bermanfaat dalam kedokteran nuklir adalah *Positron Emission Tomography* (PET) dan *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT). Kedua peralatan ini memberikan informasi fungsi dan anatomi organ dan sangat cocok untuk memantau proses dinamik seperti metabolisme sel atau aliran darah dalam jantung, paru, dan juga otak. Keduanya menggunakan kamera gamma untuk mendeteksi sinar gamma yang dipancarkan radioisotop tertentu yang ada dalam tubuh pasien.

Pada studi *in vitro*, dari tubuh pasien diambil sejumlah tertentu bahan biologis yang kemudian direaksikan dengan suatu zat yang telah ditandai dengan radioisotop. Pemeriksaan dilakukan dengan bantuan detektor sinar gamma yang dirangkai dengan suatu sistem instrumentasi. Studi semacam ini biasanya dilakukan untuk mengetahui kandungan hormon-hormon tertentu dalam darah pasien seperti insulin, tiroksin dan juga penanda tumor (CA 15-3, CA-125, PSA dan lainnya).

Radioisotop yang digunakan sebagai pernafas di dalam tubuh mempunyai waktu paro fisik maupun biologik yang singkat untuk menunjang diagnostik dan terapi, antara lain Iodium-131 (I-131), Teknisium (Tc-99m), Talium-201 (Tl-201), Galium-67 (Ga-67), Indium-111 (In-111), Fluorin-18 (F-18), dan Iodium-125 (I-125). Radioisotop tersebut dikemas dengan bahan obat tertentu untuk mencapai organ target sesuai keinginan dan disebut dengan radiofarmaka. Bahan obat non radioaktif atau yang disebut dengan kit ini antara lain MDP, DTPA, MAG3, MIBI, Tetrofosmin, Infekton, ECD, IDA, mebrofenin, dan Sulfur koloid.

Bila untuk keperluan diagnostik, radioisotop yang diberikan dalam dosis yang sangat kecil, maka dalam terapi radioisotop sengaja diberikan dalam dosis yang besar untuk mematikan sel penyusun kanker. Tindakan terapi pada kedokteran nuklir antara lain terutama digunakan terhadap kanker tiroid dan hipotiroid dengan NaI-131 (diminumkan), kanker hati dengan Y-90 (disuntikan),



gambar 105.
Skema dari PET

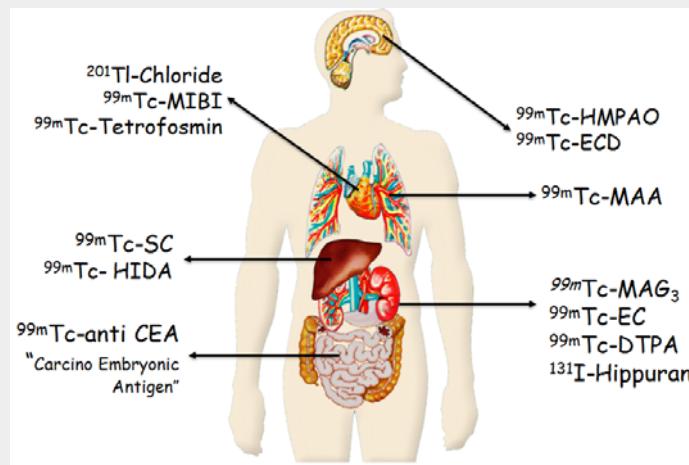


gambar 106.
Radiofarmaka

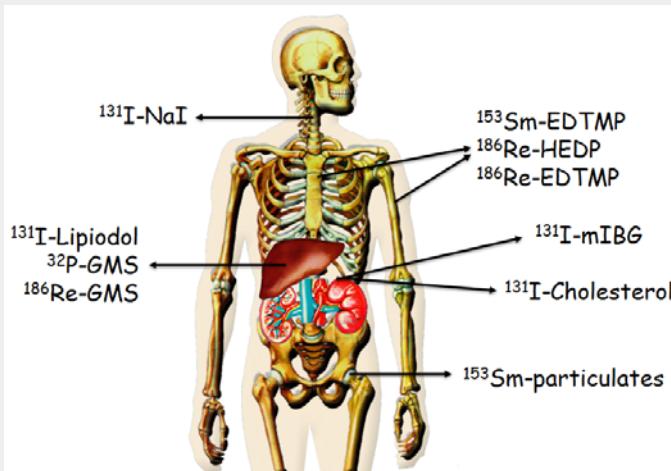
Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

gambar 107.
Radiofarmaka
untuk keperluan
diagnostik

anak sebar di tulang dengan P-32, Sr, dan Sm (disuntikan), dan osteoarthritis dengan *rhenium* (disuntikan *intra synovia*).



gambar 107.
Radiofarmaka
untuk keperluan
terapi



6.4

Sterilisasi Alat dan Produk Kesehatan

Beberapa alat dan produk kesehatan misalnya kateter, jarum suntik, sarung tangan bedah dan hemodialiser pada penggunaannya berkontak langsung dengan jaringan atau cairan tubuh. Oleh karena itu produk tersebut harus steril atau bebas dari mikroorganisme hidup terutama yang bersifat potogen. Sebagian besar produk alat kesehatan terutama terbuat dari bahan polimer yang tidak tahan pemanasan dengan suhu tinggi, karena itu sterilisasi yang dapat digunakan adalah sterilisasi dingin menggunakan gas etilen oksida (ETO) atau radiasi.

Sterilisasi dengan gas ETO mempunyai beberapa kelemahan misalnya bersifat toksik pada manusia, meninggalkan residu gas yang bersifat karsinogenik pada produk, polusi terhadap lingkungan, dan memerlukan karantina produk 7-14 hari. Dengan demikian radiasi pengion merupakan pilihan yang tepat untuk sterilisasi dingin terhadap produk yang tidak tahan panas seperti alat kedokteran dan *tissue graft*.

Dosis sinar gamma dari irradiator dengan sumber Co-60 atau Cs-137 yang digunakan dalam proses sterilisasi bergantung pada jenis bahan yang disterilkan, jenis mikroba, dan tingkat populasi mikroba. Perlu dipahami bahwa materi atau alat yang diradiasi tidak akan menjadi sumber radiasi atau bersifat radioaktif.

Beberapa keuntungan sterilisasi menggunakan radiasi dibandingkan dengan metode sterilisasi lain adalah sterilisasi dilakukan pada suhu kamar, tidak menimbulkan kenaikan temperatur yang berarti, dapat menembus ke dalam seluruh bagian produk dan dalam kemasan akhir, tidak merusak bahan yang disterilisasi, waktu iradiasi sebagai variabel pengontrol keseluruhan proses, lebih efektif karena dapat mencapai 100% steril pada dosis tinggi, dapat mesterilkan bahan dalam jumlah banyak untuk sekali proses radiasi, tidak meninggalkan residu, dan dapat digunakan pada produk akhir.



gambar 108.
Peralatan
kedokteran
yang disterilisasi
dengan radiasi

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

tabel 6.
Nilai SAL dari
beberapa alat
kesehatan dan
sediaan farmasi

Suatu produk dikatakan steril bila produk tersebut bebas dari mikroorganisme hidup. Tetapi tidak ada satupun sistem sterilisasi yang mampu mengukur nilai absolut, sehingga semua proses sterilisasi mempunyai keterbatasan dalam membunuh mikroorganisme. Oleh karena itu selalu terdapat suatu probabilitas teoritik dari non sterilitas yang dikenal dengan istilah *Sterility Assurance Level* (SAL). SAL adalah probabilitas mikroorganisme hidup dalam suatu produk setelah proses sterilisasi dan dinyatakan dalam nilai 10^{-n} . Artinya dari 10 produk yang disterilkan hanya boleh satu produk yang tidak steril.

| SAL 10-3 | SAL 10-6 |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Kantung urin▪ Bedak bayi▪ Bahan pengemas▪ <i>Bioassay plate</i>▪ Sarung tangan eksperimen▪ Kondom | <ul style="list-style-type: none">▪ <i>Bone graft</i>▪ <i>Syringes</i>▪ Jarum suntik, benang suntik▪ Tetes mata▪ Sarung tangan bedah▪ Pisau bedah dan peralatan operasi lainnya▪ <i>Internal cateter</i> |

Pemilihan nilai SAL didasarkan atas penggunaan produk tersebut. Untuk produk yang digunakan berkontak langsung dengan jaringan tubuh atau darah nilai SAL adalah 10^{-6} , sedangkan untuk produk yang tidak berkontak langsung dengan darah mempunyai nilai SAL 10^{-3} . Pemilihan dosis sterilisasi antara lain didasarkan pada jumlah dan tipe mikroorganisme kontaminan yang ada pada produk, kondisi sterilisasi yang digunakan, dan nilai SAL yang ditetapkan.

Beberapa *International Standardization Organization* (ISO) yang dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan dosis sterilisasi, validasi, verifikasi serta persyaratan lainnya dari produk kesehatan yang akan disterilkan dengan radiasi antara lain:

1. ISO 11737-1: *Sterilization of Medical Devices – Microbiological Methods – Part 1: Estimation of Population of Microorganisms on Products.*
2. ISO 11737-2: *Sterilization of Medical Devices – Microbiological Methods – Part 2: Test of Sterility Performed in the Validation of a Sterilization Process.*

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

3. ISO 11137: *Sterilization of Health Care Products – Requirement of Validation and Routine Control – Radiation Sterilization.*
4. ISO 13409: *Sterilization of Health Care Products – Radiation Sterilization – Substantiation of 25 kGy as a Sterilization Dose for Small or Infrequent Production Batches.*
5. *Good Manufacturing Practices (GMP).*
6. *Good Radiation Practices (GRP).*

Selain standar internasional, dalam Farmakope Indonesia Edisi IV disebutkan bahwa dosis sterilisasi yang digunakan untuk produk kesehatan adalah 25 kGy. Dosis yang lebih rendah dapat digunakan bergantung dari kandungan mikroba awal dan jenis mikroba serta faktor lainnya.

Teknologi nuklir sangat aman untuk diaplikasikan pada jaringan biologi untuk keperluan transplantasi karena dapat mencegah terjadinya penularan penyakit dari donor ke resipien terutama yang dapat ditularkan oleh virus seperti HIV, hepatitis, *cytomegalovirus*, sapi gila, *dengue*, dan flu burung N5H1, dan oleh kuman patogen seperti penyakit TBC, sipilis, dan lainnya. Jaringan tubuh manusia maupun hewan telah banyak digunakan pada pasien untuk berbagai tujuan. Berdasarkan sumber dari jaringan, *graft* dapat dibagi menjadi empat kelompok yaitu *autograft* (penggunaan *graft* dalam individu yang sama), *allograft* (penggunaan *graft* dari individu berbeda dalam satu spesies), *xenograft* (penggunaan *graft* dari spesies berbeda), dan *alloplastic graft* (*graft* sintetik inert).

Di Indonesia, pengambilan dan pemakaian kembali jaringan biologi diizinkan berdasarkan Undang Undang Nomor 23 tahun 1992 tentang kesehatan. *Graft* jaringan dapat disiapkan dalam bentuk segar dan awetan. Jaringan untuk transplantasi dapat disiapkan dengan cara pembekuan, *liofilisasi*, demineralisasi dan kemudian disterilkan dengan iradiasi. Sterilitas *graft* baik segar maupun awetan merupakan hal yang penting diperhatikan untuk mengurangi risiko penularan penyakit dari donor ke resipien, serta memperpanjang masa simpan. Sterilisasi secara dingin menggunakan sinar gamma atau berkas elektron merupakan pilihan yang tepat untuk mensterilkan *graft* jaringan dan telah banyak digunakan untuk sterilisasi jaringan biologi.

Sesuai dengan kebutuhan, *graft* dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

| No | Contoh/bahan | Dosis (kGy) |
|----|-------------------------|-------------|
| 1 | Sliming tea | 5 |
| 2 | Teh racik | 5 |
| 3 | Kapsul Sediaan Herbal | 5 |
| 4 | Kaplet Padibu | 5 - 7 |
| 5 | Chilly powder | 10 |
| 6 | Serbuk jahe | 10 |
| 7 | Botol Insto | 25 |
| 8 | Surgical gloves | 25 |
| 9 | Allograft dan xenograft | 25 |
| 10 | Jaringan amnion | 25 |

tabel 7.
Sediaan
farmasi dan
bahan lain yang
dipasteurisasi/
disterilisasi
dengan radiasi

dll. Untuk mengatasi masalah keamanan produk dan keselamatan pasien penerima, tahap tahap pemrosesan seperti seleksi dan skrining donor dilakukan secara ketat, diikuti dengan proses pencucian dan pasteurisasi, serta sterilisasi produk akhir.

6.5

Bank Jaringan di Indonesia

Di Indonesia saat ini telah berdiri empat Bank Jaringan yang siap melayani kebutuhan pasien, yaitu:

1. Bank Jaringan Riset Batan (BJRB) menyediakan *allograft*, *xenograft*, dan jaringan *amnion* *liofilisasi* steril radiasi untuk keperluan klinik.
2. Pusat Biomaterial/Bank Jaringan RSUP Dr. Sutomo, Surabaya, menyediakan berbagai *allograft*, *xenograft*, dan amnion steril radiasi.
3. Bank Jaringan RSUP Dr. M. Jamil, Padang, memproduksi amnion steril radiasi.
4. Bank Jaringan RSK Sitanala, Tangerang memproduksi amnion steril radiasi.

ukuran misalnya morsellize atau berbentuk chip, *granul*, *strut* dan *osteochondral*. Dalam bidang ortopedi, bentuk *morsellize* dan chip umumnya digunakan sebagai pengisi dari *cavity*, *bettres*, atau sebagai tambahan dari *autograf*. Granula tulang demineralisasi diproduksi untuk meningkatkan aktivitas *bone morphogenic protein* (BMP) suatu *growth factor* yang berperan sebagai osteoinduksi.

Tulang demineralisasi sangat banyak dipakai pada bedah mulut dan maksilosial misalnya untuk rekonstruksi tulang rahang, *periodontal bone defect*, koreksi *dental defect*, dll. Sesuai dengan keperluannya, *graft* tulang demineralisasi dapat disediakan dalam bentuk bubuk, granula, kubus, batangan, batang korek api, *perforated cortical block*,

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

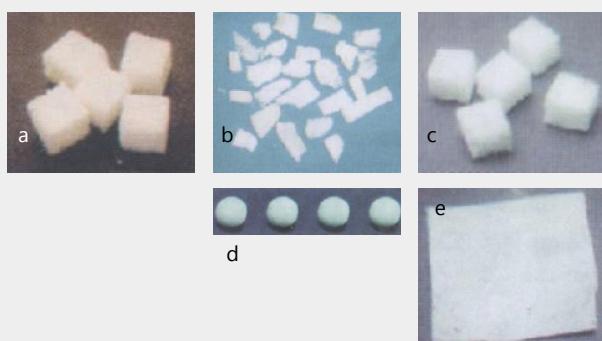
Sampai tahun 2003, dari semua bank jaringan tersebut telah dihasilkan 8500 *graft* yang telah dipakai oleh lebih dari 40 rumah sakit di Indonesia.

Alograft dan Xenograft Steril Radiasi

Graft tulang dapat berfungsi sebagai kekuatan mekanik dan/atau sebagai fungsi biologi. Sebagai contoh *graft* tulang femur bagian atas digunakan untuk memperbaiki total *hip arthroplasty* harus memiliki kekuatan mekanik, sedang tulang *deminerlized bone matrix* (DBM) digunakan dalam *posterior lateral spinal fusion* yang berfungsi untuk merangsang pembentukan jaringan baru tulang, tidak memerlukan fungsi mekanik.

Kebutuhan tulang *allograft* dan *xenograft* di Indonesia dari tahun ke tahun terus meningkat, sedang produksi graft tulang dari Bank Jaringan di Indonesia hanya mencapai sekitar 2000 graft per tahun. Pengguna *allograft* dan produksi BJR hingga saat ini antara lain dokter spesialis ortopedi, bedah plastik, mata, dan gigi di 29 rumah sakit, antara lain RSUP Persahabatan Jakarta, RSAU Jakarta, RS Mitra Keluarga Kemayoran dan Bekasi, RSUP M.Jamil Padang, RS Hasan Sadikin Bandung, RS Mata Cicendo bandung, dan RS Mata Dr. Yap Yogyakarta.

Saat ini untuk menanggulangi keterbatasan penyediaan tulang *allograft*, BJR telah melakukan inovasi dengan memanfaatkan tulang *xenograft* yang berasal dari sapi muda. Penelitian tentang sifat fisik, mekanik dan kimia terhadap tulang *xenograft* sterilisasi radiasi menunjukkan bahwa mutu *xenograft* dari sapi muda sesuai standar untuk implantasi. Begitu pula uji



gambar 109.
Jaringan steril
radiasi produksi
BJRB: Alograft
(a&b), Xenograft
(c&d), dan
amnion (e)

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan

pra klinik dan klinik yang dilakukan di Balai POM Depkes dan RS. Fatmawati, Jakarta menunjukkan tidak terjadi reaksi penolakan. Tulang *allograft* produksi BJR B yang digunakan untuk operasi emergensi ortopedi di Rumah Sakit Dr. M. Djamil, Padang, menunjukkan pertumbuhan kalus yang sangat bermakna dibandingkan dengan tanpa penambahan graft tulang.

Membran Amnion Liofilisasi Steril Radiasi

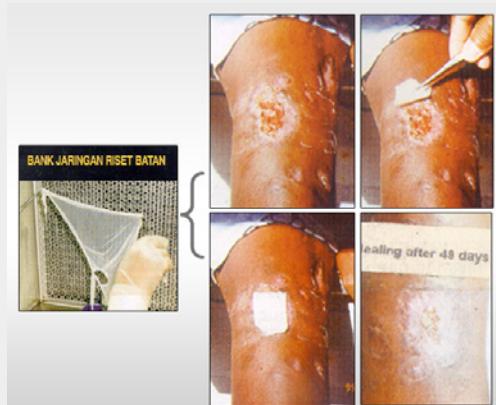
Membran amnion atau membran fetus terdiri dari membran amnion dan chorion. Amnion merupakan lapisan dalam yang tipis, kuat dan mengkilat, terdiri atas sel epitel pipih dan kuboid serta jaringan penunjang mesenkim. Sedang chorion merupakan lapisan terluar yang lebih padat dan tebal. *Chorion* dihubungkan dengan jaringan *mesenkim* oleh amnion. Bagian terluar *chorion* dibentuk oleh sel *epitel transisional* yang tebal.

Jaringan amnion terdiri dari lapisan: *epithelium*, *membran basalis*, lapisan compactum, lapisan fibroblast, dan lapisan spongiosa dengan ketebalan antara 0,02 dan 0,4 mm. Di seluruh lapisan membran amnion tidak ditemukan adanya pembuluh darah, limfa dan saraf. Komposisi amnion terdiri dari protein, karbohidrat, lemak, dan bermacam-macam *growth factor* yang memiliki berbagai fungsi biologi spesifik yang mempunyai kelebihan bila digunakan sebagai penutup luka maupun transplantasi.

BJRB hingga saat ini telah dapat memproduksi jaringan amnion yang diawetkan dengan cara liofilisasi dan kering udara kemudian disterilkan dengan iradiasi gamma dosis 25 kGy. Rata-rata dihasilkan 500 paket amnion siap pakai per tahun. Hingga saat ini produk tersebut telah digunakan oleh 34 rumah sakit di Indonesia. Pemanfaatan membran amnion siap pakai di Indonesia cukup luas, antara lain sebagai penutup luka operasi, penutup luka pada sunat, luka bakar, penutup *ulkus plantar* pada penderita kusta, *ulkus* pada penderita diabetes, *pterygium*, *symblepharon*, kerusakan kornea, dan *rekonstruksi vagina*.

Kemampuan radiasi untuk menyebabkan terjadinya kerusakan atau mutasi materi genetik pada sel dapat diaplikasikan dalam bidang pangan dalam rangka memperbaiki sifat tanaman yang disebut juga dengan pemuliaan tanaman hingga diperoleh varietas unggul berbagai jenis tanaman pangan dan lainnya. Radiasi juga dapat diaplikasikan pada pengendalian hama tanaman pangan dengan teknik serangga mandul, dan pada pengawetan bahan pangan melalui mekanisme sterilisasi dan pasteurisasi. Sedangkan

Bab 6 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Kesehatan



gambar 110.
Amnion dari
plasenta
digunakan
sebagai
pembalut luka



gambar 111.
Granula tulang

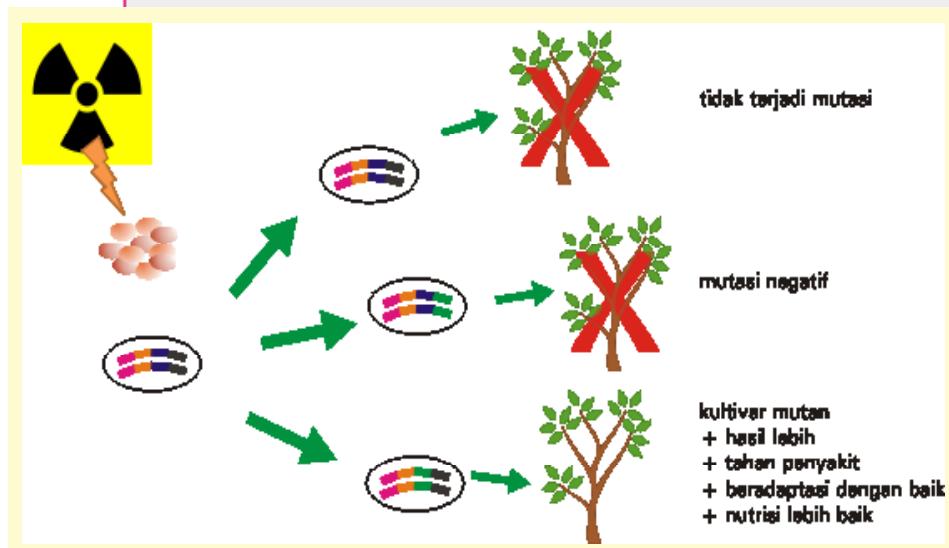
penggunaan teknologi isotop dapat melacak penyerapan unsur hara tanaman dan dapat menentukan dari mana unsur tersebut berasal, sehingga diperoleh paket teknologi pemupukan yang efisien.

7.1 Pemuliaan Tanaman

gambar 112. Kemungkinan variasi fenotip yang muncul setelah perlakuan iradiasi pada materi genetik tanaman

Mutasi buatan yang diinduksi dengan radiasi dapat dilakukan pada organ reproduksi tanaman tertentu seperti biji, stek batang, serbuk sari, akar rhizome, kalus dan sebagainya. Radiasi dapat dimanfaatkan untuk pemuliaan tanaman dalam rangka meningkatkan frekuensi dan keragaman genetik tanaman yang memungkinkan untuk melakukan seleksi genotip sesuai dengan aspek pemuliaan yang dikehendaki. Mutasi buatan dapat menimbulkan perubahan genetik tanaman baik ke arah positif maupun negatif, dan kemungkinan mutasi yang terjadi dapat juga kembali normal (*recovery*). Mutasi yang terjadi ke arah "sifat positif" dan terwariskan (*heritable*) ke generasi berikutnya merupakan mutasi yang dikehendaki oleh pemulia tanaman pada umumnya. Sifat positif yang dimaksud adalah tergantung pada tujuan pemuliaan tanaman.

Pemuliaan tanaman dengan teknik nuklir dapat diawali dengan mengiradiasi materi genetik tanaman melalui iradiasi biji, stek batang, serbuk sari, akar rhizome, kalus atau yang lainnya dengan sinar gamma. Setelah perlakuan iradiasi akan terjadi beberapa kemungkinan pada materi genetik tanaman



Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan



tersebut yaitu mutasi ke arah positif, mutasi ke arah negatif, atau tanpa mutasi. Dari variasi fenotip yang timbul dilakukan seleksi sifat yang lebih baik untuk dikembangkan menjadi varietas unggul. Tanaman yang telah mengalami perubahan akibat terjadinya mutasi genetik disebut *mutan* sedangkan zat yang menyebabkan terjadinya mutasi disebut mutagen. Radiasi terhadap materi genetik tanaman tidak mengakibatkan tanaman atau produk tanaman tersebut menjadi bersifat radioaktif sehingga semua hasil pemuliaan tanaman dengan radiasi aman dikonsumsi manusia.

Mengingat di Indonesia hama dan penyakit utama padi sawah antara lain adalah wereng coklat *Nilaparvata Lugens Stal* dan penyakit hama daun bakteri *Xanthomonas Oryzae*, maka tujuan pembentukan varietas unggul pada padi sawah ditekankan pada ketahanan terhadap kedua hama dan penyakit tersebut

gambar 113.
Irradiator
Gamma Cell-220
untuk litbang
pemuliaan
tanaman di
BATAN



gambar 114.
Proses pemuliaan
tanaman
pisang dengan
sinar gamma
Co-60 untuk
mendapatkan
varietas baru
dengan pohon
yang pendek,
berbunga lebih
cepat dengan
buah yang lebih
banyak dan
harum

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

gambar 115.
Varietas padi
unggul Mira-1



selain sifat unggul lainnya seperti produksi tinggi, umur genjah, dan kualitas beras yang bagus dengan tekstur nasi pulen. BATAN memiliki fasilitas yang dibutuhkan untuk penelitian pemuliaan tanaman dengan teknik radiasi antara lain *Gamma Chamber* dan *Gamma Cell* dengan sumber radiasi Cobalt-60 laju dosis tinggi, *Gamma Room* dengan sumber radiasi Cobalt-60 laju dosis rendah, laboratorium kultur jaringan, ruang tumbuh, rumah kaca, kebun percobaan dan sawah.

Setelah perlakuan radiasi dengan sinar gamma, materi reproduktif tanaman ditumbuhkembangkan di ruang tumbuh, rumah kaca, atau langsung di kebun percobaan. Analisis mutan tanaman dilakukan di laboratorium dengan memperhatikan sifat genetik, biologi dan agronominya baik secara visual fenotip maupun secara biologi molekuler atau bioteknologi lainnya. Tanaman yang diteliti dikelompokkan sebagai tanaman pangan (padi, kedelai, kacang hijau, kacang tanah, sorghum, dan gandum), tanaman hortikultura (pisang, cabai, bawang merah, dan bawang putih), tanaman industri (kapas, sorghum, jarak, dan gandum), tanaman bunga (krisan dan anggrek), dan tanaman pakan ternak (sorghum).



gambar 116.
Varietas padi
unggul Bestari

Sampai tahun 2009 BATAN telah melepas secara nasional 15 varietas unggul padi untuk program peningkatan produktivitas pangan bagi kesejahteraan masyarakat Indonesia yang telah disertifikasi oleh Departemen Pertanian. Selain itu juga telah dihasilkan 5 varietas unggul kedelai, 1 varietas unggul kacang hijau dan 1 varietas unggul kapas. Selain varietas unggul, juga terdapat sejumlah galur mutan harapan tanaman pangan dan hortikultura yang masih dalam proses pengembangan untuk menjadi varietas unggul antara lain padi, kedelai, kacang hijau, kacang tanah, sorgum, gandum, bawang merah, artemisia (tanaman obat), kapas, jarak pagar, dan ornamental (tanaman hias).

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

Varietas padi hasil litbang BATAN, secara komulatif sampai dengan tahun 2009 telah ditanam di 23 provinsi dengan luasan lebih dari 2 juta hektar. Pada perioda 2004 - 2009, telah diperoleh Surat Keputusan Pelepasan dari Menteri Pertanian pada verietas unggul berikut:

1. SK Pelepasan Menteri Pertanian No. 573/Kpts/SR.120/10/2004, 12 Oktober 2004 untuk varietas unggul padi Yuwono.
2. SK Pelepasan Menteri Pertanian No. 574/Kpts/SR.120/10/2004, 12 Oktober 2004 untuk varietas unggul padi Mayang.
3. SK Pelepasan Menteri Pertanian No. 134/Kpts/SR.120/3/2006, 6 Maret 2006 untuk varietas unggul padi Mira-1.
4. SK Pelepasan Menteri Pertanian No. 1012/Kpts/SR.120/7/2008, 28 Juli 2008 untuk varietas unggul padi Bestari.

tabel 8.
Varietas unggul
padi hasil litbang
BATAN

| Varietas Padi | Keunggulan |
|----------------------|---|
| Atomita 1 – 4 | Produksi tinggi 4,5 -7 ton/ha, rasa nasi sedang-pulen, tahan wereng coklat biotipe 1 |
| Cilosari | Produksi tinggi 5-6,5 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, tahan hawar daun strain 3, rasa nasi pulen |
| Kahayan | Produksi tinggi 4-10 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, tahan hawar daun strain 3, &4, rasa nasi pulen |
| Winongo | Produksi tinggi 4-9 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, tahan hawar daun strain 3&4, rasa nasi sangat pulen |
| Woyla | Produksi tinggi 5-7 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, tahan hawar daun strain 3, rasa nasi pulen |
| Merauke | Produksi tinggi 5-7 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, tahan hawar daun strain 3, rasa nasi pulen |
| Diah Suci | Produksi tinggi 6-7 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2 agak tahan biotipe 3, tahan hawar daun strain 3 agak tahan strain 4, rasa nasi sangat pulen |
| Mayang | Produksi tinggi 6-11 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2 agak tahan biotipe 3,tahan hawar daun strain 3 agak tahan strain 4, rasa nasi pulen |
| Juwono | Produksi tinggi 6-9 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2 agak tahan biotipe 3, tahan hawar daun strain 3 agak tahan strain 4, rasa nasi pulen |
| Situgintung | Produksi tinggi 2-3,5 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1, agak tahan biotipe 2, agak tahan blast, rasa nasi enak |
| Mira 1 | Produksi tinggi 6-9 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, agak tahan biotipe 3, tahan hawar daun strain 3, agak tahan strain 4, rasa pulen. |
| Bestari | Produksi tinggi 6-9 ton/ha, tahan wereng coklat biotipe 1&2, agak tahan biotipe 3, tahan hawar daun strain 3, agak tahan strain 4, rasa pulen. |

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

5. SK Pelepasan Menteri Pertanian No. 1013/Kpts/SR.120/7/2008, 28 Juli 2008 untuk varietas unggul kedelai Mitani.
6. SK Menteri Pertanian No. 337/Kpts/SR.120/3/ 2008, tanggal 28 Maret 2008 untuk Varietas Kapas Karisma-1.

gambar 117.
Ukuran biji
varietas
unggul kedelai
Muria (kanan)
yang lebih besar
dari biji galur
tetua (kiri)



gambar 118.
Kedelai varietas
Rajabasa (atas)

Varietas unggul kacang hijau yang telah dihasilkan diberi nama Camar dengan keunggulan mampu menghasilkan 1-2 ton/ha dan tahan terhadap penyakit bercak coklat dan kudis. Selain itu juga ada varietas unggul tanaman kapas Karisma-1 dengan keunggulan antara lain potensi produksi hingga 3740 kg kapas berbiji/ha, kadar serat mencapai > 43 %, umur genjah 120 hari, jarak tanam rapat (100 x10 cm), tahan hama *Helocoverpa Armigera*, dan serat sangat putih tidak memerlukan perlakuan khusus untuk pemutihan.



| Varietas Kedelai | Keunggulan |
|------------------|---|
| Muria | Produksi 1,8 ton/ha, cukup tahan penyakit karat daun |
| Tengger | Produksi 1-1,7 ton/ha, cukup tahan lalat putih dan penyakit karat daun, umur 73-79 hari |
| Meratus | Produksi 1,8 ton/ha, cukup tahan penyakit karat daun umur 73-77 hari |
| Rajabasa | Produksi 2-3,9 ton/ha, tahan penyakit karat daun, toleran cekaman masam |
| Mitani | Produksi 1,98 ton/ha,tahan hama kutu hijau, |

tabel 9. Varietas unggul kedelai yang dihasilkan BATAN

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

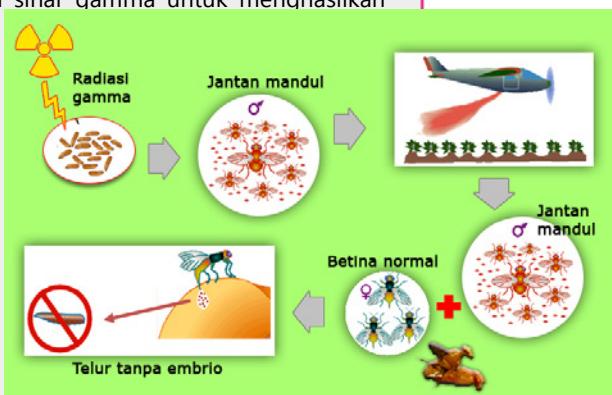


gambar 119.
Kacang hijau
varietas Camar
(kiri)
Kapas varietas
Karisma-1
(kanan)

7.2

Pengendalian Hama dengan Teknik Serangga Mandul

Teknik serangga mandul (TSM) dengan radiasi gamma bertujuan untuk pengendalian hama tanaman dan vektor penyakit pada manusia. Serangga pada stadium pupa diirradiasi dengan sinar gamma untuk menghasilkan hama jantan mandul dan kemudian dilepaskan di suatu daerah atau lahan pertanian untuk bersaing kawin dengan serangga hama di lapangan. Jantan mandul tersebut akan kawin dengan betina normal di daerah tersebut dan menghasilkan telur tanpa embrio atau tanpa keturunan. Hasil pelepasan ini akan menurunkan populasi pada generasi berikutnya. Bila beberapa generasi berturut-turut dilepaskan hama mandul sembilan kali jumlah hama lapangan maka dari generasi ke generasi populasi hama akan terus menurun sampai nol.



gambar 120.
Prinsip
mekanisme
teknik serangga
mandul dengan
radiasi

TSM telah berhasil digunakan di berbagai negara untuk mengendalikan hama tertentu sampai musnah. TSM untuk mengendalikan lalat buah *Bactrocera carambolae* telah dapat dikuasai, mengingat teknik pembiakan massal lalat buah di laboratorium dengan kapasitas produksi jutaan per minggu telah berhasil dikembangkan dan dinamika populasinya di kebun telah dipelajari.

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

Teknik serangga mandul dengan radiasi juga dapat diaplikasikan untuk pengendalian vektor penyakit pada manusia khususnya nyamuk Aedes aegypti yang merupakan vektor penyakit demam berdarah. Saat ini BATAN bekerjasama dengan Departemen Kesehatan sedang melakukan litbang dalam proses irradiasi terhadap vektor.

7.3 Pengawetan Bahan Pangan

gambar 121. Proses irradiasi pupa dan nyamuk Aedes aegypti dengan irradiator Co-60 untuk memperoleh serangga mandul

gambar 122. Kentang yang tidak diradiasi (kiri) dan Kentang yang diradiasi (kanan)

Radiasi pengion dapat pula dimanfaatkan untuk pengawetan bahan makanan, menghambat pertumbuhan, mendenda pematangan, disinfestasi serangga/hamat gudang, dekontaminasi bakteri patogen dan mensterilkan produk pangan dari segala bentuk cemaran mikroba. Proses sterilisasi makanan dengan sinar gamma ini bertujuan untuk mencegah penularan penyakit melalui makanan dan memperpanjang masa simpan. Makanan yang telah diirradiasi tidak mengalami perubahan nilai nutrisi dan tidak membuat makanan bersifat radioaktif.



Teknik pengawetan bahan pangan secara konvensional misalnya cara fisika (pemanasan, pendinginan, pembekuan, dan penekanan) dan penambahan bahan kimia (penggaraman, penambahan bahan pengawet kimia, dan antibiotik) dilakukan terutama untuk makanan olahan, akan tetapi kadang-kadang memiliki kendala yang tidak dapat dihindarkan. Untuk mengatasi hal tersebut, teknik radiasi telah

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

menunjukkan potensi yang baik sebagai alternatif untuk meningkatkan mutu bahan pangan. Hal ini disebabkan teknik radiasi mempunyai beberapa keunggulan antara lain: dapat menjaga kesegaran makanan, tidak meninggalkan residu, dapat membunuh mikroba secara efektif dan prosesnya mudah dikontrol.

Berdasarkan dosis sinar gamma, aplikasi teknik radiasi dalam bidang bahan pangan dibedakan menjadi 3 tingkat sebagai berikut.

1. Dosis rendah (<1 kGy)

- Mencegah pertumbuhan pada rimpang dan umbi-umbian (0,05 – 0,15 kGy)
- Menunda proses kematangan buah (0,1 – 1,15 kGy)
- Membunuh serangga (0,2 – 1 kGy)
- Membunuh parasit daging (0,1 – 0,3 kGy)

2. Dosis sedang (1 – 10 kGy)

- Menurunkan kandungan mikroba dengan proses pasteurisasi (0,5 – 10 kGy)
- Membunuh bakteri patogen (3 – 10 kGy)

3. Dosis tinggi (> 10 kGy)

- Membunuh semua mikroba yang ada dengan proses sterilisasi (10 – 50 kGy)

Pemakaian teknik radiasi pengion untuk pengawetan bahan pangan telah diatur oleh pemerintah Republik Indonesia melalui peraturan Menteri Kesehatan yaitu PERMENKES No.152/MENKES/SK/II/1995 dan yang terakhir PERMENKES No.701/MENKES/PER/VIII/2009.

Pada kemasan produk makanan iradiasi diberi label yang berisi keterangan tentang jenis sumber radiasi yang digunakan, waktu irradiasi, nomor lisensi serta tujuan irradiasi dan logo radura (radiation durable) yang merupakan simbol internasional untuk menunjukkan bahwa bahan telah diirradiasi. Berikut ini beberapa jenis kemasan yang dapat digunakan berdasarkan PERMENKES No.701/MENKES/PER/VIII/2009.



gambar 123.
Simbol RADURA

gambar 124.
Pepes ikan dan rendang yang diradiasi (45 kGy) dapat bertahan selama 12 bulan pada $28 \pm 2^\circ\text{C}$



Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

tabel 10.
Jenis pangan,
Tujuan dan Dosis
Serap Maksimum
(Lampiran I
PERMENKES
No.701/MENKES/
PER/VIII/2009)

Simbol dapat dibaca sebagai berikut:

1. Titik di tengah pusat menunjukan sumber radiasi.
2. Segmen lingkaran dua berbentuk daun menunjukan perisai biologis untuk melindungi para pekerja dan lingkungan.
3. Cincin luar menunjukan sistem transportasi, bagian bawah menunjukan perisai biologis dan juga menyerupai daerah loading, bagian setengah rusak atas melambangkan sinar yang masuk ke barang target pada sistem transportasi.

Beberapa keuntungan sterilisasi dengan radiasi pengion dibandingkan dengan metode sterilisasi lain adalah dilakukan pada suhu kamar, tidak menimbulkan kenaikan temperatur yang berarti, dapat menembus kedalam seluruh bagian produk dan dalam kemasan akhir, waktu iradiasi sebagai variabel dapat dikontrol dengan tepat, tidak meninggalkan residu, dan dapat dilakukan pada produk akhir.

| Jenis Pangan | Tujuan Iradiasi | Dosis Serap Maksimum |
|--|--|--|
| Umbi Lapis dan Umbi Akar | Menghambat Perunasan Selama Penyimpanan | 0,15 |
| Sayur dan Buah Segar (selain yang termasuk kelompok 1) | <ol style="list-style-type: none"> Menunda Pematangan Membasmi Serangga Memperpanjang Masa Simpan Perlakuan Karantina* | <ol style="list-style-type: none"> 1,0 1,0 2,5 1,0 |
| Produk Olahan Sayuran dan Buah** | Memperpanjang Masa Simpan | 7,0 |
| Mangga | Memperpanjang Masa Simpan | 0,75* |
| Manggis | <ol style="list-style-type: none"> Membasmi Serangga Perlakuan Karantina | <ol style="list-style-type: none"> 1,0 1,0 |
| Serealia dan Produk Hasil Penggilingannya, Kacang-kacang, Biji-bijian Penghasil Minyak, Polong-polong, Buah Kering | <ol style="list-style-type: none"> Membasmi Serangga Mengurangi Jumlah Mikroba | <ol style="list-style-type: none"> 1,0 5,0 |
| Ikan, Pangan Laut (Seafood Segar maupun Beku) | <ol style="list-style-type: none"> Mengurangi Jumlah Mikroorganisme Patogen Tertentu** Memperpanjang Masa Simpan Mengontrol Infeksi Oleh Parasit Tertentu** | <ol style="list-style-type: none"> 5,0 3,0 2,0 |
| Produk Olahan Ikan, dan Pangan Laut | <ol style="list-style-type: none"> Mengurangi Jumlah Mikroorganisme Patogen Tertentu** Memperpanjang Masa Simpan | <ol style="list-style-type: none"> 8,0 10,0 |
| Daging dan Unggas serta Hasil Olahannya (Segar maupun Beku) | <ol style="list-style-type: none"> Mengurangi Jumlah Mikroorganisme Patogen Tertentu** Memperpanjang Masa Simpan Mengontrol Infeksi Oleh Parasit Tertentu** Menghilangkan Bakteri Salmonella | <ol style="list-style-type: none"> 7,0 3,0 2,0 7,0 |
| Sayuran Kering, Bumbu, Rempah-rempah Kering (Dry Herbs) dan Herbal Tea | <ol style="list-style-type: none"> Mengurangi Jumlah Mikroorganisme Patogen Tertentu** Membasmi Serangga | <ol style="list-style-type: none"> 10,0 1,0 |
| Pangan yang Berasal dari Hewan yang dikeringkan | <ol style="list-style-type: none"> Membasmi Serangga Membasmi Mikroba, Kapang, dan Khamir | <ol style="list-style-type: none"> 1,0 5,0 |
| Pangan Olahan Siap Saji Berbasis Hewani*** | Sterilisasi dan Membasmi Mikroba Patogen termasuk Mikroba Berspora serta Memperpanjang Masa Simpan | 65 |

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

| Jenis Bahan Kemasan | Dosis Serap Maksimum (KGy) |
|--|----------------------------|
| <i>Nitrocellulose-coated cellophane</i> | 10 |
| <i>Vinylidene chloride copolymer-coated cellophane</i> | 10 |
| <i>Glassine paper</i> | 10 |
| <i>Wax-coated paperboard</i> | 10 |
| <i>Polyolefin film</i> | 10 |
| <i>Polyolefin film containing coatings comprising a vinylidene chloride copolymer with one or more of the following co-monomers : Acrylic acid, Acrylonitrile, Itaconic acid, Methylacrylate and Methyl methacrylate</i> | 10 |
| <i>Kraft paper (for packaging only)</i> | 0,5 |
| <i>Polyethylene terephthalate film</i> | 10 |
| <i>Polyethylene terephthalate film containing coatings comprising a vinylidene chloride copolymer with one or more of the following co-monomers : Acrylic acid, Acrylonitrile, Itaconic acid, Methylacrylate</i> | 10 |
| <i>Polyethylene terephthalate film containing coating consisting of polyethylene</i> | 10 |
| <i>Polystyrene film</i> | 10 |
| <i>Rubber hydrochloride film</i> | 10 |
| <i>Vinylidene Chloride-vinyl chloride copolymer</i> | 10 |
| <i>Nylon-11</i> | 10 |
| <i>Ethylene-vinyl acetate copolymer film</i> | 30 |
| <i>Vegetable parchment</i> | 10 |

tabel 11.
Jenis bahan kemasan yang diijinkan untuk digunakan pada proses iradiasi (Lampiran II PERMENKES No.701/MENKES/PER/VIII/2009)

7.4

Efisiensi Pemupukan

Studi hubungan tanah dan tanaman dapat dilakukan dengan mengaplikasikan teknik isotop, baik isotop yang bersifat stabil maupun isotop yang bersifat radioaktif. Prinsip aplikasi isotop dalam hal ini adalah untuk membedakan asal suatu unsur hara, baik antara unsur hara dari dalam tanah maupun unsur hara yang berasal dari sumber hara lain yang ditambahkan ke dalam tanah. Hasil studi dapat digunakan untuk berbagai tujuan yang terkait dengan efisiensi pemupukan, yaitu;

1. Menentukan waktu terbaik pemberian pupuk
2. Mengetahui kontribusi nutrisi dari berbagai jenis sumber hara yang berbeda
3. Menentukan efisiensi optimal penggunaan pupuk
4. Menentukan fiksasi N_2 oleh tanaman legum

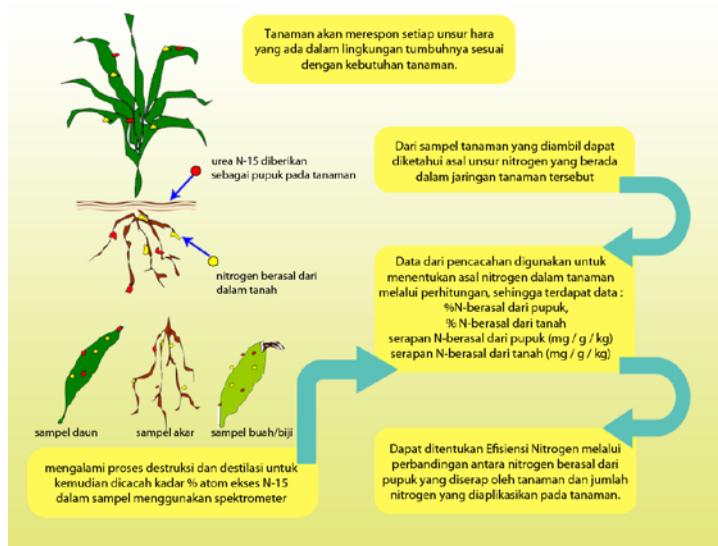
Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

5. Mengetahui akar aktif tanaman dan mempelajari pola perakaran tanaman

Isotop yang umum digunakan dalam penelitian pupuk pada tanaman adalah :

1. Nitrogen-15 (N-15)
untuk menentukan efisiensi penggunaan pupuk Nitrogen
2. Fosfor-32 (P-32)
untuk menentukan efisiensi penggunaan pupuk Phosphat
3. Seng - 65 (Zn-65)
untuk menentukan serapan Zn dalam tanaman
4. Rubidium-86 (Rb-86)
untuk menentukan distribusi unsur Kalium dalam tanaman
5. Karbon-14 (C-14)
untuk menentukan laju dekomposisi bahan organik dalam tanah dan laju fotosintesis dalam daun tanaman
6. Kalsium-45 (Ca-45)
untuk menentukan laju kalsifikasi terumbu karang

gambar 125.
Metode
Langsung Proses
Penentuan
Efisiensi
Pemupukan



Ada dua metoda aplikasi teknik isotop dalam penelitian pemupukan dan nutrisi tanaman, yaitu: metode langsung dan metode tidak langsung.

Metode langsung digunakan pada senyawa (dalam hal ini pupuk) yang dapat ditandai baik dengan radioisotop (P-32, P-33, Zn-65, dsb) ataupun isotop stabil (N-15). Sebagai contoh adalah penggunaan N-15 untuk menentukan efisiensi penggunaan pupuk.

Metode tidak langsung

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan



Contoh penandaan tanah dengan larutan isotop $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$, untuk meruntut unsur P



Tanah bertanda ditanami tanaman uji

gambar 126.
Metode Tidak
Langsung Proses
Penentuan
Efisiensi
Pemupukan

digunakan bila suatu senyawa tidak dapat ditandai dengan radioisotop ataupun isotop stabil karena akan menyebabkan perubahan sifat kimia pada bahan, misalnya pada pupuk organik dan fosfat alam. Isotop diberikan pada tanah, penghitungan kontribusi hara dari sumber hara yang dipelajari adalah melalui tanaman penguji (*reference tree*) yang ditanam pada tanah berlabel tanpa diberikan sumber hara apa pun.

Cara penghitungan dapat dilakukan dengan menggunakan 2 metode, yaitu:

a. Metode nilai-A

Contoh : penggunaan Azolla sebagai pupuk hijau pada padi sawah

Tanah + urea N-15 + Azolla tidak bertanda

diketahui ketersediaan N dalam Azolla

Dengan cara yang sama dapat diketahui ketersediaan N berasal dari pupuk hijau lainnya :

- Azolla pinnata 37 – 65 kg N/ton

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

- Gliricidia sepium 29 – 43 kg N/ton
- Leucaena leucocephala 30 – 35 kg N/ton
- Sesbania bispinosa 35 – 46 kg N/ton.

b. Metode pengenceran

Contoh : evaluasi agronomik fosfat alam (FA) dibandingkan dengan TSP

Tanah + TSP + larutan P-32
Tanah + FA + larutan P-32

diketahui ketersediaan P dalam TSP dan FA,
dapat ditentukan kesetaraan FA terhadap TSP

Melalui studi hubungan tanah dan tanaman dengan mengaplikasikan teknik isotop, berbagai rekomendasi penggunaan pupuk yang efisien sudah dihasilkan, khususnya pemupukan menggunakan pupuk hayati seperti azolla dan sesbania pada tanaman padi sehingga dapat menghemat penggunaan pupuk buatan dan ramah lingkungan.

gambar 127.
Kontribusi N
dari tanaman
pemfiksasi
N-udara
(Sesbania dan
Azolla)

Teknik radiasi digunakan untuk mensterilkan bahan pembawa pada produksi pupuk hayati. Pupuk hayati Azofert merupakan hasil penelitian PATIR - BATAN yang saat ini sedang dalam tahap berbagai pengujian untuk dapat diikutsertakan dalam program sertifikasi. Bahan baku pupuk hayati ini adalah konsorsium bakteri *rhizosfer* yang mampu memfiksasi nitrogen, melarutkan fosfat dan merangsang pertumbuhan dan perkembangan tanaman (berperan sebagai *Plant Growth Promotor* = PGPR).



Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan



gambar 128.
Proses
Pembuatan
Pupuk Hayati



gambar 129.
Aplikasi pupuk hayati Azofert
di lahan petani pada berbagai
jenis sayuran

7.5 Peternakan

BATAN sebagai lembaga litbang ikut berperan dalam mendukung peningkatan sektor peternakan. Litbang peternakan yang dilakukan BATAN lebih mengarah pada peningkatan produksi ternak, perbaikan sistem reproduksi, kesehatan dan manajemen ternak. Keuntungan penggunaan teknik nuklir dalam litbang peternakan yaitu kepekaan deteksi tinggi, akurat, efektif, efisien, aman, dan ekonomis. Dalam bidang peternakan, seperti bidang lainnya, pemanfaatan teknik nuklir dilakukan baik dengan menggunakan radioisotop sebagai peruntun maupun energi radiasinya.

Teknik peruntutan adalah proses pemanfaatan senyawa yang telah ditandai dengan isotop stabil atau radioisotop untuk menjadi bagian dari sistem biologik sehingga dapat diketahui mekanisme yang terjadi atau diperoleh

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

suatu hasil pengukuran. Isotop stabil yang umum digunakan adalah N-15, Cr-52, dan C-13, sedangkan radioisotopnya antara lain adalah C-14, Ca-45, P-32, I-125, I- 131, dan H-3. Prinsip teknik peruntutan dengan isotop stabil adalah sifat kimia spesifik dari unsur yang digunakan dengan berat molekul yang berbeda dan diukur dengan alat *Mass Atomic Spectrophotometer*, *X-ray flourescene* (XRF), dan *Neutron Atomic Absorbtion* (NAA). Prinsip teknik peruntutan dengan radioisotop adalah paparan radiasi dari unsur radioaktif yang digunakan yang diukur antara lain dengan alat *Liquid Scintilation Counter* (LSC), *Gamma Counter* dan HPGe.

Pemanfaatan teknik nuklir untuk peruntutan dapat dilakukan secara *in vivo* untuk mengetahui proses biologi yang terjadi di dalam tubuh hewan ternak dan *in vitro* untuk memperoleh informasi tentang proses biologi yang dilakukan di luar tubuh hewan yaitu di laboratorium. Beberapa isotop dan radioisotop yang umum digunakan dalam litbang peternakan ditunjukkan pada tabel 12.

tabel 12.
Isotop dan
Kegunaannya

| Unsur | Pemanfaatan |
|----------------------|---|
| Isotop Stabil | |
| N-15 | Penentuan siklus protein dalam tubuh (<i>in vivo</i>) |
| Cr-52 | Prediksi volume rumen dan laju pencernaan (<i>in vivo</i>) |
| C-13 | Pengukuran dinamika populasi mikroba dalam rumen (<i>in vitro</i>) |
| Radioisotop | |
| I-131 | Litbang endokrinologi terutama T3/T4 (RIA) secara <i>in vivo</i> |
| H-3 | Penentuan volume cairan dalam tubuh (<i>in vivo</i>) |
| I-125 | Litbang endokrinologi terutama konsentrasi P4 (progesteron) – RIA (<i>in vitro</i>) |
| C- 14 | Pengukuran pertumbuhan bakteri rumen dan juga filtrasi urin (<i>in vitro</i>) |
| Ca- 45 | Pengukuran deposisi Ca pada tulang (<i>in vitro</i>) |
| P - 32 | Pengukuran pertumbuhan bakteri rumen (<i>in vitro</i>) |

Pemanfaatan energi radiasi di bidang peternakan antara lain untuk melemahkan patogenisitas penyakit seperti bakteri, virus, dan cacing dengan menghasilkan radiovaksin, reagen diagnostik, dan pengawetan.

Peningkatan Produksi ternak

Kegiatan di BATAN yang terkait nutrisi ternak lebih fokus pada nutrisi untuk ternak ruminansia dan ikan. Dalam hal ini, teknik nuklir yang digunakan

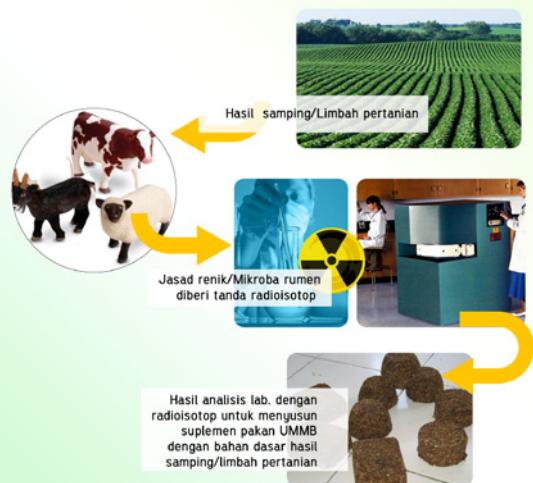
Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

yaitu radiasi pengion, perunut radioisotop serta beberapa analisis unsur berdasarkan emisi radiasi. Bahan pakan yang digunakan diutamakan bahan lokal daerah tertentu sesuai dengan daerah dimana pakan tersebut akan digunakan. Disamping itu bahan pakan yang dipilih dipastikan tidak bersaing dengan kebutuhan manusia. Penelitian dengan teknik perunut, dilakukan secara in-vitro untuk mengetahui produksi biomassa mikroba di dalam rumen setelah diberikan pakan yang diuji. Semakin tinggi produksi biomassa mikroba, maka kualitas pakan semakin baik. Radioisotop yang digunakan sebagai perunut adalah P-32, S-35 dan N-15.

Bahan yang digunakan untuk pembuatan pakan yaitu sludge kelapa sawit, limbah pembuatan kecap, bungkil kedelai, tepung ikan, menir, dedak, dan vitamin, sedangkan hormon *metiltestosteron* (MT) digunakan untuk menjantankan anak ikan (*sex reversal*). Penentuan konsentrasi hormon testosteron dilakukan menggunakan teknik *radioimmunoassay* (RIA) dengan perunut I-125. Semua kegiatan penelitian dengan perunut radioisotop dilakukan secara in-vitro, untuk mencegah kontaminasi radioisotop kepada ternak atau hewan.

Radiasi pengion juga dapat digunakan untuk dekontaminasi bahan pakan. Selain itu, analisis kandungan mineral pakan yang diuji dilakukan dengan teknik nuklir, yaitu analisis pengaktifan netron (APN) atau spektrofotometer sinar-X (*X-Rays Spectrophotometer*). Keuntungan penggunaan teknik nuklir ini adalah dapat melakukan analisis beberapa jenis mineral sekali running sehingga efisien, dan dapat mendeteksi kandungan mineral yang rendah dan lebih hemat biaya.

gambar 130.
Proses
pembuatan
pakan UMMB



Hasil-hasil yang telah dicapai yaitu :

1. UMMB (Urea Molases Multinutrient Block)

Adalah pakan suplemen yang berbentuk blok keras dan agak manis, terdiri dari

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan



gambar 130.
UMMB hasil
penelitian
PATIR – BATAN

gabungan beberapa jenis bahan pakan sebagai sumber energi, molases, protein, vitamin dan mineral. UMMB ini merupakan suplemen pakan (SP) untuk ternak ruminansia seperti sapi, kerbau, kambing, domba dan lainnya. Ciri khas ternak ruminansia adalah adanya rumen yang merupakan ekosistem mikroba yang berperan dalam penguraian bahan pakan sebagai sumber protein bagi ternak.

Pemberian SP bertujuan untuk meningkatkan konsumsi pakan pada kondisi pemeliharaan tradisional. Kandungan protein kasar UMMB sekitar 18 – 21%. UMMB mampu memberikan pertambahan bobot badan sampai 0,8 kg/ekor/hari pada sapi peranakan *Ongol* (PO), 1 kg/ekor/hari pada sapi peranakan *Frisian Holstein* (FH), dan sampai 0,5 kg/ekor/hari pada sapi Bali. UMMB juga mampu meningkatkan produksi susu dari sebelumnya sampai 2 liter/ekor/hari pada sapi perah peranakan FH di Garut.

2. SPM (Suplemen Pakan Multinutrien) Adalah pakan suplemen yang berbentuk tepung terdiri dari gabungan beberapa jenis bahan pakan sebagai sumber energi. Karena terbatasnya ketersediaan molasses pada daerah tertentu maka SPM dirancang dengan menggunakan molasses dalam jumlah kecil. Kandungan protein kasar SPM sekitar 18 – 21%.



3. Formula stimulant pakan ikan (SPI) yang memanfaatkan sludge kelapa sawit sebagai sumber protein utama dan ditambahkan 2% hormon metil testosterone.

4. Hormon metil testosterone, adalah hormon yang dimanfaatkan sebagai campuran pakan ikan, berguna untuk menjantankan anak ikan (*sex reversal*).

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

Reproduksi dan Kesehatan Ternak

Dalam bidang kesehatan ternak, teknik nuklir dapat digunakan untuk pembuatan vaksin yang di radiasi yang dikenal dengan nama radiovaksin. Vaksin adalah suspensi mikroorganisme yang dapat menimbulkan penyakit tetapi telah dimodifikasi dengan cara mematikan atau menatenuasi sehingga tidak akan menimbulkan penyakit dan dapat merangsang pembentukan kekebalan/antibodi dalam tubuh bila diinokulasikan. Keunggulan pembuatan vaksin dengan radiasi dibandingkan dengan cara konvensional adalah proses pembuatan vaksin yang lebih cepat dengan mempersingkat waktu pasasel, tanpa mempengaruhi kualitas vaksin yang dihasilkan. Vaksin yang dikenal saat ini dapat dikelompokkan ke dalam tiga kelompok yaitu, vaksin hidup (*live vaccine*), vaksin dimatikan (*killed vaccine*) dan vaksin sub unit.

Vaksin radiasi yang sedang dikembangkan termasuk jenis vaksin hidup, dengan melemahkan bakteri atau parasit menggunakan iradiasi. Pembuatan vaksin dengan cara melemahkan organisme penyebab infeksi untuk memperoleh strain yang virulensinya sangat berkurang telah diakui keampuhannya. Secara konvensional atenuasi vaksin (penurunan patogenitas) dilakukan secara kimiawi dan fisika misalnya dengan melakukan adaptasi temperatur, menurunkan patogenitas *E. tenella* isolat lokal dengan seleksi precocious, untuk membandingkan patogenitas *E. tenella* isolat lokal tanpa seleksi (galur tetua) dan dengan seleksi *precocious* (galur *precocious*).

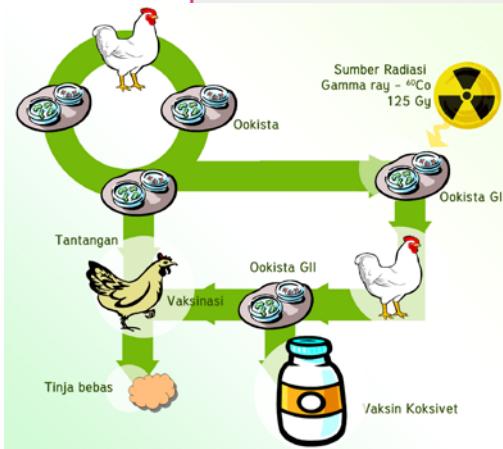
Sumber radiasi yang digunakan untuk pembuatan radiovaksin adalah sinar gamma yang digunakan untuk menurunkan infektivitas, virulensi dan patogenitas agen penyakit tetapi tetap mampu merangsang timbulnya kekebalan pada tubuh terhadap infeksi penyakit. Penelitian yang dilakukan saat ini adalah pengembangan vaksin terhadap penyakit ternak seperti Brucellosis dan Mastitis, dan terhadap penyakit ternak yang berasal dari mikroorganisme dan cacing seperti *Coccidiosis*, *Fasciolosis*, dan *Haemonchosis*.

Salah satu radiovaksin yang telah diproduksi adalah vaksin koksivet untuk penyakit koksidiosis yaitu penyakit yang disebabkan oleh protozoa *Emeria* sp. dalam usus yang mengakibatkan berak darah. Tahapan proses pembuatan radiovaksin diawali dengan pemberian radiasi gamma dengan dosis 125 Gy pada ookista generasi I yang kemudian diinokulasikan ke

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

gambar 133.
Proses
pembuatan
vaksin koksvit

dalam tubuh ayam untuk memperoleh ookista generasi II dengan tingkat infektivitas dan patogenitas yang rendah. Selanjutnya ookista generasi II inilah yang dijadikan vaksin yang siap untuk diinokulasikan ke dalam tubuh ayam umur 7 – 10 hari untuk memperoleh kekebalan terhadap penyakit tersebut.



Salah satu aplikasi teknik nuklir dalam bidang reproduksi ternak yaitu penggunaan teknik RIA (*radioimmunoasssay*). Teknik RIA (*radioimmunoasssay*) progesteron dapat menginterpretasikan gambaran fungsi faali reproduksi ternak dengan melihat profil hormon progesteron, sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi gangguan reproduksi pada ternak yang kinerja reproduksinya rendah. Penggunaan kit RIA progesteron dapat mengetahui potensi kembar dengan cara memantau tingkat konsentrasi hormon P4 pada fase *luteal* (11 hari setelah ovulasi).

Dibandingkan dengan pemantauan visual, pemantauan dengan teknik RIA progeteron terhadap tenggang waktu antara kelahiran hingga pelaksanaan IB (inseminasi buatan) pertama post partum, dan ternak berhasil bunting menunjukkan hasil yang lebih baik yaitu $96,7 \pm 13,6$ vs $136,1 \pm 6,9$ hari. Data pemantauan dari aplikasi teknik RIA P4 dapat di manfaatkan dalam tindakan antisipatif, seperti afkir atau penggantian ternak, sehingga penampilan reproduksi ternak dapat terjaga dengan baik.

gambar 134.
(dari atas ke
bawah)
Vaksin koksvit,
Vaksin radiasi
Fasciolosis, dan
Teknologi
Radioimunoassay
(RIA) Progesteron
(P4)



Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

| Litbang | Tujuan | Keterangan |
|--|--|---|
| Vaksin koksivet | Untuk mencegah penyakit berak darah (koksidiosis) pada anak ayam | Vaksin sudah di produksi oleh PUSVETMA Surabaya Dosis radiasi 125 Gy |
| Vaksin radiasi Fasciolosis | Untuk mencegah penyakit fasciolosis (cacing hati) pada ternak ruminansia | <ul style="list-style-type: none">• dibuat dari bibit <i>Fasciola gigantica</i> strain lokal• tidak timbul efek samping dan tidak toksik• dosis radiasi 45 Gy <p>Dalam proses mencari mitra untuk produksi secara komersial</p> |
| Teknologi Radioimunoassay (RIA) Progesteron (P₄) | <ul style="list-style-type: none">• deteksi pubertas ternak• deteksi gejala birahi• diagnosa kebuntingan dini• mendukung program Inseminasi buatan• diagnosa kelainan reproduksi ternak. | Kit RIA P ₄ diproduksi oleh PRR – BATAN |

tabel 13.
Hasil-hasil yang telah dicapai terkait kesehatan dan reproduksi ternak

8.1 Organisasi Internasional

Kewenangan dalam mengatur dan mengawasi pemanfaatan teknik nuklir ada pada Pemerintah setiap negara bersangkutan. Namun demikian, beberapa ketentuan yang disusun oleh Organisasi Internasional juga harus diperhatikan, bahkan beberapa ketentuan internasional seringkali harus dijadikan acuan dalam penyusunan peraturan di tingkat nasional. Organisasi Internasional yang berkaitan dengan pengaturan masalah proteksi radiasi, yaitu :

1. Badan Tenaga Atom Internasional atau *International Atomic Energy Agency* (IAEA)
2. Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiologis atau *International Commission on Radiological Protection* (ICRP)
3. Komisi Internasional untuk Satuan dan Pengukuran Radiologi atau *International Commission on Radiological Units and Measurements* (ICRU).



IAEA
International Atomic Energy Agency
Atoms for Peace

IAEA merupakan salah satu Badan yang bernaung di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa. Badan tersebut didirikan pada tahun 1956 dan merupakan Badan khusus yang dibentuk untuk mempromosikan pemanfaatan tenaga nuklir untuk maksud damai dalam rangka meningkatkan kesejahteraan hidup bangsa-bangsa di seluruh dunia. Dalam melaksanakan kegiatannya, Badan Tenaga Atom Internasional diberi kuasa untuk menerapkan standar keselamatan terhadap risiko akibat radiasi pengion. Setiap pemerintah suatu negara ataupun pihak yang memperoleh bantuan dari Badan tenaga Atom Internasional harus tunduk pada ketentuan kesehatan dan

keselamatan yang ditentukan oleh Badan tersebut. Ketentuan kesehatan dan keselamatan yang dikeluarkan oleh Badan Tenaga Atom Internasional dituangkan dalam bentuk Publikasi *Safety Series* yang diterbitkan oleh Badan itu. Publikasi pertamanya adalah *Safety Series No. 1 : Safe Handling of Radioisotopes*, (Vienna, 1962).

ICRP merupakan organisasi independen dan tidak terikat oleh pihak atau

Bab 8 Proteksi Radiasi

negara manapun dengan keanggotaan bersifat perorangan, terdiri dari para ahli dalam masalah keselamatan dan kesehatan radiasi. Komisi ini didirikan oleh Kongres Internasional Radiologi ke-2 pada tahun 1928 sebagai Komisi Internasional untuk Proteksi Terhadap Radium dan Sinar-X. Namun pada tahun 1950, Komisi tersebut merubah namanya menjadi ICRP.

Dalam menjalankan kewajibannya, Komisi ini menganut kebijaksanaan bahwa dalam mempersiapkan rekomendasi dilakukan melalui pokok-pokok proteksi radiasi dan menyerahkan tanggung jawab penjabarannya kepada pemerintah setempat. Komisi ini juga mengeluarkan publikasi dalam bentuk ICRP *Report* dan *Annals of the ICRP*. Publikasi pertamanya adalah ICRP Report No. 1 : *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection* (Pergamon Press, Oxford, 1959).



ICRU didirikan pada tahun 1925. Tujuan utama dari pendirian Komisi ini adalah untuk mengembangkan rekomendasi mengenai satuan dan pengukuran radiologi yang secara internasional dapat diterima, terutama dalam masalah-masalah sebagai berikut :

1. Besaran dan satuan radiologi dan radioaktivitas.
2. Prosedur yang tepat untuk pengukuran dan penerapan besaran-besaran tersebut dalam radiologi klinis dan radiobiologi.
3. Data fisika yang diperlukan dalam penerapan prosedur tersebut, yang bila digunakan akan menjamin keseragaman dalam pelaporan.



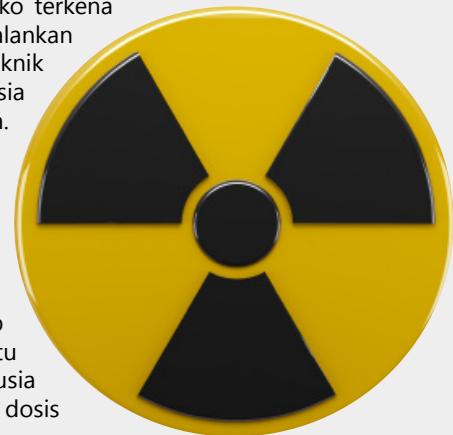
Dalam menjalankan misinya, ICRU melakukan kerja sama dengan ICRP. Komisi ini berpendapat bahwa organisasi nasional dalam suatu negara mempunyai tanggung jawab untuk menentukan sendiri prosedur teknik yang terperinci mengenai pengembangan dan pemeliharaan

standar dalam proteksi radiasi. Meskipun demikian, ICRP menganjurkan agar semua negara menyesuaikan sedekat mungkin dengan konsep dasar dari besaran dan satuan radiasi yang direkomendasikan secara internasional. Komisi Internasional untuk Satuan dan Pengukuran Radiologi mengeluarkan publikasi dalam bentuk ICRU Report, seperti ICRU Report No. 33 : *Radiation Quantities and Units* (Washington, D.C., 1980).

8.2

Filosofi Dasar Proteksi Radiasi

Selain memberikan manfaat, aplikasi teknik nuklir dapat pula memberikan ancaman bahaya radiasi yang perlu diwaspadai. Setiap pekerja radiasi selalu mempunyai risiko terkena paparan radiasi pengion selama menjalankan tugasnya. Dalam pemanfaatan teknik nuklir, faktor keselamatan manusia harus mendapatkan prioritas utama. Tentu pemanfaatan teknik nuklir akan lebih sempurna jika faktor kerugian yang mungkin timbul dapat ditekan serendah mungkin atau dihilangkan sama sekali. Ada berbagai jenis radiasi pengion yang berpotensi memberikan efek merugikan terhadap tubuh manusia. Efek merugikan itu dapat muncul apabila tubuh manusia mendapatkan paparan radiasi dengan dosis yang berlebihan.



Keselamatan radiasi atau yang lazim disebut proteksi radiasi merupakan suatu cabang ilmu pengetahuan atau teknik yang mempelajari masalah kesehatan manusia maupun lingkungan dan berkaitan dengan pemberian perlindungan kepada seseorang atau sekelompok orang ataupun kepada keturunannya terhadap kemungkinan yang merugikan kesehatan akibat paparan radiasi. Tujuan dari keselamatan radiasi ini adalah mencegah terjadinya efek deterministik yang membahayakan dan mengurangi terjadinya efek stokastik serendah mungkin.

Melalui pemahaman cabang ilmu tersebut, kelompok orang yang berhubungan atau bekerja dengan radiasi pengion diusahakan agar :

1. Dapat mempunyai apresiasi tentang keselamatan radiasi dan sekaligus mempunyai pengertian tentang falsafah kesehatan lingkungan.
2. Dapat menjadi kawan yang baik dari radiasi pengion sehingga dapat memperoleh manfaat secara maksimum dari radiasi tersebut dengan kemungkinan menderita kerugian atau resiko yang minimum.

8.3

Asas-asas Proteksi Radiasi

Falsafah baru tentang proteksi radiasi muncul dengan diterbitkannya Publikasi ICRP No. 26 Tahun 1977. Untuk mencapai tujuan proteksi radiasi, yaitu terciptanya keselamatan dan kesehatan bagi pekerja, masyarakat dan lingkungan, maka dalam falsafah proteksi radiasi diperkenalkan tiga asas proteksi radiasi, yaitu :

1. Asas Justifikasi atau Pemberanakan

Asas ini menghendaki agar setiap kegiatan yang dapat mengakibatkan paparan radiasi hanya boleh dilaksanakan setelah dilakukan pengkajian yang cukup mendalam dan diketahui bahwa manfaat dari kegiatan tersebut cukup besar dibandingkan dengan kerugian yang dapat ditimbulkannya.

2. Asas Optimisasi

Asas ini menghendaki agar paparan radiasi yang berasal dari suatu kegiatan harus ditekan serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Asas ini juga dikenal dengan sebutan ALARA atau *As Low As Reasonably Achievable*. Dalam kaitannya dengan penyusunan program proteksi radiasi, asas optimisasi mengandung pengertian bahwa setiap komponen dalam program telah dipertimbangkan secara seksama, termasuk besarnya biaya yang dapat dijangkau. Suatu program proteksi dikatakan memenuhi asas optimisasi apabila semua komponen dalam program tersebut disusun dan direncanakan sebaik mungkin dengan memperhitungkan biaya yang dapat dipertanggungjawabkan secara ekonomi.

ALARA Designs



Time • Distance • Shielding



gambar 135.
Desain dari
ALARA :
waktu (time),
jarak (distance),
dan pelindung
(shielding)

3. Asas Pembatasan Dosis Perorangan

Asas ini menghendaki agar dosis radiasi yang diterima oleh seseorang dalam menjalankan suatu kegiatan tidak boleh melebihi Nilai Batas yang telah ditetapkan oleh Instansi Yang Berwenang. Dengan menggunakan program proteksi radiasi yang disusun secara baik, maka semua kegiatan yang mengandung resiko paparan radiasi cukup tinggi dapat ditangani sedemikian rupa sehingga tidak melampui Nilai Batas Dosis *NBD) yang ditetapkan.

Tujuan dari asas optimisasi dalam proteksi adalah untuk mendapatkan hasil optimum yang meliputi kombinasi penerimaan dosis yang rendah, baik individu maupun kolektif, minimnya resiko dari pemaparan yang tidak dikehendaki, dan biaya yang murah. Asas optimisasi sangat ditekankan oleh ICRP. Setiap kegiatan yang memerlukan tindakan proteksi, terlebih dahulu harus dilakukan analisa optimisasi proteksi. Penekanan ini dimaksudkan untuk meluruskan kesalahpahaman tentang sistem pembatasan dosis yang sebelumnya dikenal sebagai konsep ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*). Baik Asas Optimisasi maupun ALARA keduanya sebetulnya sangat menekankan pada pertimbangan faktor-faktor ekonomi dan sosial, dan tidak semata-mata menekankan pada rendahnya penerimaan dosis oleh pekerja maupun masyarakat dengan menempuh jalan apapun.

Dengan asas optimisasi diharapkan bahwa dosis yang diterima oleh pekerja dalam menjalankan tugasnya tetap serendah mungkin dengan biaya yang terjangkau. Sebaliknya, penekanan semata-mata pada penerimaan dosis oleh pekerja yang sangat rendah dengan menempuh jalan apapun dengan biaya yang tidak dapat dipertanggungjawabkan secara ekonomi tidak termasuk dalam asas optimisasi. Jika hal ini terjadi, konsep ALARA telah berubah menjadi ALATA (*As Low As Technically Achievable*) yang hanya mempertimbangkan faktor teknik dengan mengandalkan teknologi mutakhir atau terbaik yang belum tentu terjangkau secara ekonomi.

8.4

Budaya Keselamatan

Budaya keselamatan merupakan konsep baru yang diperkenalkan dalam bidang keselamatan nuklir, yang juga sejalan dengan program optimisasi

Bab 8 Proteksi Radiasi

dalam proteksi radiasi. Budaya keselamatan merupakan aturan sikap dan tingkah laku untuk mewujudkan tercapainya kondisi keselamatan kerja yang diharapkan. Tidak adanya budaya keselamatan dapat mengakibatkan kecelakaan maupun penerimaan dosis yang sebetulnya bisa dihindari. Budaya keselamatan dikembangkan berdasarkan banyaknya pengalaman maupun kenyataan bahwa penyebab terjadinya kecelakaan dan pemaparan radiasi yang tidak dikehendaki umumnya melibatkan beberapa kesalahan manusia (*human error*) termasuk keteledoran.

Meskipun terjadinya kesalahan maupun kecelakaan dapat diperkecil dengan persyaratan dan penggunaan peralatan maupun prosedur dengan baik, namun peralatan tersebut dapat saja gagal berfungsi jika dioperasikan di luar jangkauannya. Dari sini terlihat bahwa keselamatan yang memadai tidak dapat dijamin semata-mata dari penggunaan peralatan dan penyusunan prosedur yang baik dan memadai. Budaya keselamatan dari pekerja tetap memegang peranan yang sangat besar dalam upaya mewujudkan keselamatan kerja berbasis optimisasi. Personil yang terlibat dalam suatu pekerjaan harus siap dan mampu mengantisipasi problem sebelum terjadi, merasakan gejala-gejala yang muncul, mengambil tindakan yang sesuai untuk menyelesaikan permasalahan atau memperkecil konsekuensinya.

Untuk mewujudkan tercapainya keselamatan kerja berbasis optimisasi, diperlukan pengetahuan dan latihan serta kesadaran akan pentingnya keselamatan kerja, baik bagi pekerja sendiri maupun masyarakat sekitarnya. Lingkungan kerja yang baik serta dukungan yang memadai dari sistem manajemen juga sangat diperlukan untuk mewujudkan program tersebut. Peraturan-peraturan yang ketat dan ditegakkan dapat memacu sikap menuju ke arah tercapainya budaya keselamatan. Pengetahuan, latihan, kesadaran akan keselamatan, dukungan manajemen, penerangan dan pendekatan melalui peraturan merupakan unsur-unsur utama dari budaya keselamatan. Terciptanya budaya keselamatan pada setiap individu pekerja radiasi merupakan modal utama untuk mewujudkan program proteksi radiasi yang baik melalui penekanan asas optimisasi.



Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

9.1

Proteksi Radiasi pada Manusia

Perpindahan energi dari radiasi kepada materi yang dilaluinya dapat menimbulkan berbagai jejak atau respon tertentu yang dapat diamati. Kuantitas jejak yang timbul akan sebanding dengan jumlah energi radiasi yang dialihkan ke materi tersebut. Oleh sebab itu, bahan-bahan yang mampu memperlihatkan gejala tertentu apabila berinteraksi dengan radiasi dapat dipakai sebagai pemantau (detektor) radiasi. Beberapa jenis jejak yang dapat timbul dari interaksi itu antara lain adalah : emulsi fotografik, luminesensi, perubahan rapat optis (warna), kalor, konduktivitas listrik, oksidasi-reduksi, pengionan, reaksi nuklir dan kerlipan cahaya.

Manusia tidak memiliki indera khusus yang peka terhadap radiasi pengion, sehingga keberadaan radiasi ini tidak dapat diketahui secara langsung oleh sistem panca indera manusia. Mata manusia misalnya, hanya peka atau mampu melihat radiasi elektromagnetik berupa cahaya tampak dengan rentang energi antara 1,5 dan 3 eV. Sementara radiasi elektromagnetik lainnya, seperti sinar-X dengan rentang energi antara 12 sampai dengan beberapa ratus eV tidak akan dapat dilihat langsung oleh mata manusia. Oleh sebab itu, untuk dapat mengamati adanya radiasi pengion di sekitarnya, manusia harus mengandalkan alat pantau radiasi. Dalam bab ini akan dibahas berbagai jenis fenomena fisika maupun kimia yang timbul dari interaksi antara radiasi dengan materi serta pemanfaatannya untuk keperluan pemantauan radiasi.

Dalam setiap pemanfaatan radiasi pengion harus diusahakan agar penerimaan dosis radiasi oleh pekerja selalu serendah mungkin sehingga nilai batas dosis yang telah ditetapkan tidak terlampaui. Salah satu cara untuk menghindari terjadinya pemaparan radiasi pengion yang berlebihan terhadap tubuh manusia adalah dengan melakukan pemantauan rutin dosis perorangan para pekerja radiasi. Untuk menghindari kemungkinan buruk yang tidak diinginkan, para pekerja radiasi harus mendapatkan pelayanan pemantauan dosis perorangan selama menjalankan tugasnya. Dengan program pemantauan dosis pekerja secara ketat, penerimaan dosis oleh para pekerja radiasi akan tetap terkontrol dan dapat diambil tindakan proteksi secepat mungkin apabila jumlah penerimaan dosis akumulasinya melampaui nilai batas dosis yang telah ditetapkan.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Seiring dengan perkembangan penggunaan zat radioaktif dan/atau sumber radiasi lainnya serta meningkatnya tuntutan jaminan keselamatan dalam melakukan pekerjaan, maka program pemantauan dosis pekerja memegang peranan yang penting dalam rangka pemanfaatan radiasi dalam berbagai bidang kegiatan. Program pemantauan dosis perorangan harus merupakan bagian dari setiap kegiatan pemanfaatan teknologi nuklir. Program pemantauan dosis pekerja ini harus disusun sedemikian rupa sehingga mampu mendeteksi setiap kelainan operasional sekecil apapun yang dapat menjurus ke arah terjadinya kecelakaan sehingga menyebabkan terjadinya pemaparan radiasi yang berlebihan terhadap pekerja.

Pemantauan Dosis Eksterna

Pemantauan radiasi eksterna dilakukan terhadap pekerja yang mempunyai potensi terpapar radiasi dari sumber eksterna. Potensi paparan eksterna terdapat pada para pekerja radiasi yang menggunakan sumber-sumber radiasi terbungkus beraktivitas tinggi atau sangat tinggi atau bekerja dengan mesin pembangkit radiasi dengan laju dosis yang besar. Pemantauan radiasi eksterna dimaksudkan agar dosis akumulasi dari sumber-sumber eksterna yang diterima pekerja selama menjalankan tugas tetap terkontrol.

Manusia tidak memiliki indera khusus yang peka terhadap radiasi. Oleh sebab itu, dalam setiap melakukan pengukuran radiasi, manusia harus mengandalkan pada kemampuan alat ukur radiasi. Dalam hal pemantauan dosis perorangan, manusia mengandalkan pada dosimeter perorangan. Dosimeter perorangan adalah alat pencatat dosis radiasi yang mampu merekam dosis akumulasi yang diterima oleh setiap individu pekerja radiasi. Ada berbagai jenis dosimeter perorangan yang sampai saat ini telah berhasil dikembangkan, antara lain dosimeter film emulsi, dosimeter zat padat seperti dosimeter *thermoluminesensi* (TLD), dosimeter kamar pengionan gas seperti dosimeter saku (pocket dosimeter) dan lain-lain.

Dilihat dari sudut kepekaannya terhadap radiasi yang ada di lapangan dimana para pekerja radiasi bekerja, maka masing-masing jenis dosimeter tersebut dapat dibagi-bagi lagi sesuai dengan tujuan penggunaannya. Dosimeter film emulsi misalnya, dapat dibagi menjadi dosimeter film neutron (untuk memantau dosis neutron) dan dosimeter film gamma (untuk memantau

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

dosis gamma). Demikian pula TLD, ada yang dirancang untuk pemantauan radiasi beta, radiasi gamma, neutron maupun campuran berbagai jenis radiasi seperti beta-gamma, neutron-gamma serta neutron-beta-gamma.

Interpretasi dan evaluasi penerimaan dosis radiasi yang diterima oleh setiap pekerja radiasi didasarkan pada hasil rekaman dosimeter perorangan yang dipakai selama berada di daerah radiasi. Evaluasi tersebut dilakukan secara periodik, misal setiap bulan atau setiap kwartalan. Sebagai penunjang, pada saat melakukan operasi tertentu, pekerja radiasi seringkali dilengkapi pula dengan dosimeter lain yang memungkinkan interpretasi penerimaan dosis dapat dilakukan secara cepat atau seketika setelah selesai melakukan pekerjaan dengan radiasi. Berikut ini akan dibahas beberapa jenis dosimeter perorangan yang saat ini digunakan secara luas untuk pemantauan dosis eksterna perorangan pekerja radiasi.

Dosimeter film emulsi merupakan jenis dosimeter perorangan yang pertama kali digunakan. Karena proses kerjanya cukup sederhana, maka hingga kini dosimeter film ini masih digunakan secara luas. Dalam kegiatan rutin pemantauan dosis perorangan, dosimeter film yang telah dipakai oleh para pekerja radiasi, film kalibrasi serta film kontrol yang tidak menerima paparan radiasi dikembangkan bersama-sama dalam larutan pengembang. Pemrosesan film dilakukan di ruang gelap dengan cara membuka bungkus kertas film. Film yang sudah terbuka selanjutnya dimasukkan ke dalam larutan pengembang (developer) selama kurang lebih lima menit dilanjutkan

gambar 136.
Dosimeter film
emulsi



Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

ke larutan pemantap (fixer) selama kurang lebih 10 menit. Dalam pemakaian, film emulsi tidak merekam secara langsung dosis radiasi yang diterimanya. Efek yang tampak pada film adalah timbulnya kehitaman setelah proses pengembangan dan pemantapan. Tingkat kehitaman film atau lebih sering dikenal dengan kerapatan optis ini sebanding dengan besar dosis radiasi yang diterima sebelumnya.

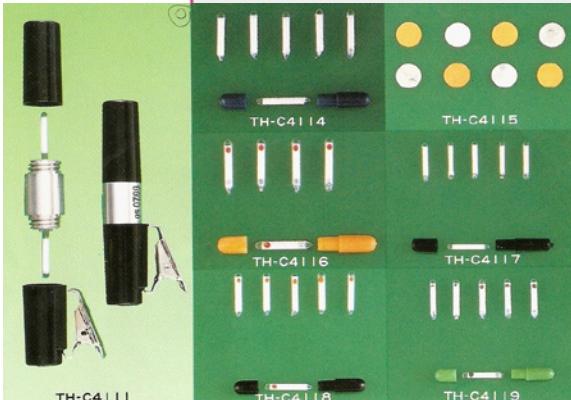
Untuk perhitungan dosis yang diterima pemakai dosimeter, film pemantau yang telah diproses dibaca kerapatan optisnya pada berbagai posisi filter dengan densitometer (alat pembaca kerapatan optis film). Hasil bacaan kerapatan optis dapat ditransfer menjadi data dosis radiasi semu menggunakan kurva kalibrasi yang dibuat dengan sinar gamma.

Ada berbagai jenis dosimeter perorangan zat padat yang saat ini banyak digunakan untuk keperluan rutin pemantauan dosis perorangan pekerja radiasi. Berikut akan dibahas salah satu jenis dosimeter tersebut yang saat ini digunakan secara luas, yaitu TLD. Keuntungan dalam penggunaan TLD ini adalah mudah dalam pengoperasian, evaluasi dosis dapat dilakukan lebih cepat dari pada dosimeter lainnya, mampu memantau radiasi dengan rentang dosis dari rendah hingga tinggi, dapat dipakai ulang dan tidak peka terhadap faktor-faktor lingkungan. Namun demikian, TLD juga mempunyai kelemahan karena data dosis langsung hilang setelah proses pembacaan, sehingga tidak bisa dilakukan pembacaan ulang apabila ditemukan hal-hal yang meragukan.

Metode pengukuran radiasi dengan memanfaatkan fenomena thermoluminesensi pertama kali diperkenalkan pada tahun 1953. Pada saat itu belum sepenuhnya diketahui bahwa metode thermoluminesensi dapat dikembangkan untuk tujuan pemantauan dosis perorangan. Dalam kegiatan rutin pemantauan dosis pekerja, saat ini TLD sering kali dimanfaatkan untuk pemantauan radiasi beta, gamma maupun neutron. Oleh sebab itu, dipasaran dapat ditemukan berbagai merek dagang TLD yang dibuat dari berbagai jenis bahan disesuaikan dengan tujuan penggunaannya. TLD pada umumnya dapat memberikan tanggapan terhadap sinar-X, sinar gamma, sinar beta, elektron dan proton dengan jangkauan dosis radiasinya dari 0,1 mGy sampai dengan kira-kira 1.000 Gy.

Selain dosimeter film emulsi dan TLD, ada dosimeter jenis lain yang juga sering digunakan untuk kegiatan rutin pemantauan dosis perorangan,

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan



gambar 137.
Berbagai jenis
TLD untuk
pemantauan
dosis pekerja
radiasi (sumber :
Chiyoda, Japan)

yaitu dosimeter saku (*pocket dosimeter*). Dikatakan dosimeter saku karena ukuran dosimeter ini cukup kecil dan dalam penggunaannya dapat dimasukkan ke dalam saku pakaian/kemeja maupun jas laboratorium pekerja radiasi. Terdapat dua jenis dosimeter saku yang sering digunakan, yaitu dosimeter saku jenis kapasitor dan dosimeter saku jenis baca langsung.

Dosimeter saku hanya dimaksudkan sebagai pelengkap terhadap dosimeter perorangan lainnya. Dosimeter ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti dosimeter film maupun TLD. Meskipun kemasukan dosimeter ini cukup luas digunakan karena kemampuannya memberikan bacaan data penerimaan dosis secara langsung.

dosimeter perorangan seperti dosimeter film maupun TLD. Meskipun memiliki beberapa kelemahan, namun dosimeter ini cukup luas digunakan karena kemampuannya memberikan bacaan data penerimaan dosis secara langsung.



gambar 138.
Dosimeter
saku (sumber :
Chiyoda, Japan)

Pemantauan Dosis Interna

Pemantauan dosis interna dilakukan terhadap pekerja yang menggunakan sumber terbuka dan mempunyai potensi kemasukan zat radioaktif ke dalam tubuhnya dalam jumlah yang cukup berarti. Pemantauan dosis interna dimaksudkan untuk mengetahui jumlah dan jenis zat radioaktif yang mengendap dalam organ tubuh tertentu dan menginterpretasikan jumlah dosis yang mungkin diterima organ itu.

Pemantauan kadar kontaminan radioaktif baik yang terdapat dalam udara maupun permukaan daerah kerja (lantai serta fasilitas kerja lainnya) sering kali dapat dipakai untuk memperkirakan jumlah pemasukan zat radioaktif ke dalam tubuh pekerja. Namun untuk beberapa kondisi kerja tertentu, pemantauan dosis interna terhadap para pekerja radiasi masih tetap diperlukan. Jenis maupun metode pemantauan dosis interna yang akan dilakukan bergantung pada jenis radionuklida yang

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

diperkirakan mengendap di dalam tubuh.

Pemantauan dosis interna dilakukan terhadap para pekerja radiasi yang dalam melakukan kegiatannya berhubungan dengan sumber-sumber radiasi terbuka, atau pekerja lainnya yang mempunyai potensi kemasukan zat radioaktif ke dalam tubuhnya. Dosimetri interna berhubungan dengan kegiatan pemantauan dosis interna dengan tujuan utamanya adalah :

1. Melakukan pemantauan dan identifikasi jenis bahan radioaktif yang mengendap di dalam tubuh pekerja.
2. Memperkirakan jumlah kontaminan yang ada dalam kaitannya dengan batasan yang dapat diterima tubuh.
3. Dalam hal terjadi kontaminasi interna dalam jumlah yang cukup berarti, dosimetri interna dimaksudkan untuk memperkirakan dosis radiasi yang diterima tubuh atau organ-organ tertentu di dalam tubuh. Namun kegiatan ini sering kali sulit dilakukan jika asal dan waktu berlangsungnya proses pemasukan zat radioaktif tidak diketahui secara pasti.

Pemantauan radiasi interna dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain dengan teknik pemeriksaan langsung menggunakan alat pencacah radiasi seluruh tubuh (*whole body counter*, WBC), pemeriksaan/pengambilan sampel biologis dari dalam tubuh seperti urine, faeces dan darah yang dikenal dengan istilah bio-assay, maupun menggunakan teknik pencacahan langsung terhadap organ-organ tertentu seperti pencacahan kelenjar gondok dan paru-paru.

Pencacah Radiasi Seluruh Tubuh

Pengendapan zat radioaktif di dalam tubuh ada kalanya dapat diukur langsung dari luar tubuh menggunakan alat cacaah radiasi seluruh tubuh. Namun pencacahan langsung ini hanya efektif untuk pemeriksaan zat-zat radioaktif pemancar sinar-X maupun gamma dan juga pemancar beta murni yang mempunyai energi beta cukup tinggi untuk menghasilkan spektrum Bremmstrahlung dalam organ-organ di dalam tubuh. Pengukuran dari luar tubuh dimungkinkan mengingat daya tembus radiasi ini terhadap jaringan lunak tubuh manusia cukup kuat. Radiasi jenis foton yang dipancarkan zat radioaktif dapat diukur menggunakan pencacah sintilasi sodium-iodine (NaI) berukuran besar.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan



gambar 139.
Pemantauan
sumber interna
dengan alat
cacaht seluruh
tubuh (sumber :
JAERI, Japan)

Pencacahan seluruh tubuh digunakan untuk memantau dan mengukur jumlah total radionuklida yang ada di dalam tubuh. Kesulitan dapat muncul dalam kegiatan ini karena ukuran tubuh manusia cukup besar untuk dicacah dengan detektor radiasi dan juga karena radionuklida yang dicacah tidak terdistribusi secara merata di seluruh tubuh. Secara umum, identifikasi adanya radionuklida pemancar foton di dalam tubuh dapat dilakukan dengan cara menampilkan spectrum gamma tersebut melalui sistem penganalisa saluran ganda (*multi channel analyzer, MCA*). Oleh sebab itu, detektor radiasi untuk pencacahan seluruh tubuh ini harus memiliki resolusi (daya pisah) spektrum- Δ yang baik serta efisiensi deteksi yang tinggi terhadap foton.

Detektor sintilasi NaI(Tl) dapat memenuhi kedua syarat tersebut.

Pencacahan Organ

Untuk kondisi tertentu, pencacahan terhadap organ-organ khusus dapat juga dilakukan. Pencacahan organ ini merupakan tindak lanjut atas hasil yang diperoleh dari pencacahan seluruh tubuh. Sebagai contoh untuk organ-organ khusus ini adalah pencacahan kelenjar gondok dan paru-paru. Pencacahan kelenjar gondok biasanya dilakukan secara rutin untuk para pekerja radiasi yang mempunyai potensi kemasukan radioisotop Iodine (I), seperti I-131. Pencacahan ini dilakukan dengan detektor gamma NaI(Tl) dengan ukuran lebih kecil yang ditempatkan bersentuhan langsung dengan leher, berdekatan dengan lokasi kelenjar gondok. Pencacahan ini dapat dilakukan di ruangan yang tidak berperisai radiasi.

Apabila detektor NaI(Tl) dikalibrasi dengan berbagai macam radioisotop Iodine dengan bentuk geometri yang sama dengan ukuran kelenjar gondok, maka akan diperoleh efisiensi detektor pada berbagai energi gamma yang dipancarkan radioisotop Iodine. Dalam proses pengukuran, detektor NaI(Tl) dihubungkan dengan sistem penganalisa saluran ganda sehingga pada layar

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

penganalisa akan ditampilkan berbagai puncak spektrum radiasi gamma dari berbagai macam radioisotop I. Dengan menganalisa tinggi spektrum beserta letak munculnya spektrum tersebut dapat diidentifikasi aktivitas dan energi dari spektrum gamma yang bersangkutan. Dari identifikasi ini dapat diketahui jenis serta aktivitas radioisotop Iodine yang mengendap di dalam kelenjar gondok. Perhitungan dosis interna yang diterima kelenjar gondok dapat dilakukan dengan cara membandingkan aktivitas yang terukur dengan nilai batas masukan tahunan (BMT) untuk radioisotop tersebut.

Pencacahan paru-paru sering dilakukan terhadap personil pekerja radiasi yang menangani senyawa uranium kering maupun berbentuk gas, dimana selama proses tersebut pekerja mempunyai potensi kemasukan radionuklida melalui proses penghirupan. Dalam proses pencacahan paru-paru ini pekerja yang diperiksa dicacah menggunakan detektor NaI(Tl) berukuran besar dalam keadaan tidur terlentang. Detektor ditempatkan pada posisi pusat tepat di atas daerah paru-paru.

Pengambilan Sampel dari Dalam Tubuh

Radionuklida pemancar sinar alpha maupun beta tidak dapat diukur secara langsung dari luar tubuh karena energi dari kedua jenis radiasi itu akan terserap seluruhnya oleh jaringan atau organ yang mengikatnya. Radionuklida pemancar sinar alpha maupun beta hanya dapat dipantau melalui ekskresi, seperti pemantauan melalui faeces untuk jenis radionuklida yang tidak larut, pemantauan melalui urine untuk radionuklida yang dapat larut, pemantauan melalui udara pernafasan untuk radionuklida berbentuk gas maupun uap dan sebagainya. Pemeriksaan dengan teknik pengambilan sampel dari dalam tubuh ini dilakukan dengan cara menganalisa bahan-bahan yang keluar atau diambil dari tubuh, seperti urine, faeces, udara pernafasan, darah dan sebagainya. Dengan proses kimia yang sesuai, teknik pengambilan sampel ini mampu mengidentifikasi berbagai jenis radionuklida yang mengendap di dalam tubuh pekerja radiasi.

Pengukuran radionuklida yang dikeluarkan oleh tubuh melalui ekskreta dapat dipakai sebagai indikator biologis tentang kemungkinan terjadinya kontaminasi interna. Karena metode pengambilan sampelnya cukup sederhana, maka kegiatan ini sering kali dilakukan secara rutin dalam kaitannya dengan program pemantauan dosis interna perorangan. Pencacahan

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

urine misalnya, dapat dipakai untuk mengetahui kadar tritium di dalam tubuh para pekerja di reaktor nuklir, dapat pula dipakai untuk mengetahui jumlah pengendapan uranium di dalam tubuh pekerja yang berhubungan dengan uranium, seperti pekerja di penambangan, pengolahan, pengayaan, pabrikasi uranium dan olah ulang bahan bakar bekas. Pengukuran uranium dalam urine dilakukan dengan teknik fluorometri. Berbeda dengan tritium yang tersebar merata di dalam tubuh, kadar uranium di dalam urine sulit untuk dihubungkan dengan kandungan totalnya di dalam tubuh karena distribusi uranium dalam tubuh sangat bergantung pada jenis senyawa, kelarutan dan waktu pemasukannya.

Nilai Batas Dosis

Dosis radiasi yang diterima oleh seseorang dalam menjalankan suatu kegiatan tidak boleh melebihi nilai batas dosis yang telah ditetapkan oleh instansi yang berwenang. Dengan menggunakan program proteksi radiasi yang disusun dan dikelola secara baik, maka semua kegiatan yang mengandung risiko paparan radiasi cukup tinggi dapat ditangani sedemikian rupa sehingga nilai batas dosis yang telah ditetapkan tidak akan terlampaui.

Pada awalnya, pengaturan dan pengawasan penerimaan dosis oleh pekerja radiasi pada dasarnya dilakukan secara suka rela, bukan karena adanya suatu keharusan hukum. Namun kemudian manusia menyadari bahwa pengawasan dan pengaturan penerimaan dosis radiasi oleh pekerja harus dilaksanakan secara lebih terarah. Dalam hal ini harus ada perangkat peraturan yang dapat dijadikan sebagai pegangan yang mengacu pada standar tertentu. Dalam hal pembatasan penerimaan dosis oleh pekerja harus ada nilai batas dosis yang diacu sehingga pemanfaatan radiasi dapat dilakukan secara aman.

Sejarah mengenai perkembangan nilai batas dosis berawal dari munculnya kesadaran akan pentingnya proteksi radiasi yang dimulai pada awal tahun 1920-an. Pada saat itu *The British X-Ray and Radium Protection Committee* dan *American Roentgen Ray Society* mengeluarkan rekomendasi umum mengenai proteksi radiasi. Selanjutnya pada tahun 1925 diadakan Kongres Internasional Radiologi yang pertama. Pada saat itu mulai dirasakan tentang penting dan perlunya ada besaran fisika untuk menyatakan paparan radiasi.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Konggres ini akhirnya melahirkan Komisi Internasional untuk Satuan dan Pengukuran Radiologi (ICRU).

Pada tahun 1925 diperkenalkan konsep Dosis Tenggang (*tolerance dose*) yang didefinisikan sebagai : "dosis yang mungkin dapat diterima oleh seseorang terus-menerus atau secara periodik dalam menjalankan tugasnya, tanpa menyebabkan terjadinya perubahan dalam darah, atau tanpa menyebabkan kerusakan pada kulit maupun organ reproduktif pada individu yang bersangkutan". Pada tahun 1925 Mutscheller memperkirakan secara kuantitatif bahwa dosis total yang diterima selama sebulan dengan nilai dosis kurang dari 1/100 nilai dosis yang menyebabkan terjadinya erythema kulit, tidak mungkin akan menyebabkan kelainan dalam jangka panjang. Nilai penyinaran yang memungkinkan timbulnya *erythema* kulit diperkirakan 600 R. Dengan demikian nilai dosis tenggang untuk pekerja radiasi diusulkan sebesar 6 R untuk jangka penerimaan satu bulan (30 hari), atau rata-rata 200 mR per hari.

Pada tahun 1928 diadakan Kongres Internasional Radiologi ke-2. Kongres menyetujui pembentukan Komisi Internasional untuk Perlindungan Sinar-X dan Radium dan secara resmi mengadopsi satuan roentgen (R) sebagai satuan untuk menyatakan paparan sinar-X dan gamma. Pada tahun 1934, Komisi tersebut mengeluarkan rekomendasi untuk menurunkan dosis tenggang menjadi 0,2 R/hari atau 1 R/minggu. Selain itu dosis tenggang yang lebih tinggi sebesar 50 R/tahun juga direkomendasikan untuk seluruh tubuh. Sedang pada tahun 1936, nilai dosis tenggang diturunkan lagi menjadi 100 mR/hari dengan asumsi bahwa diperhitungkan ada hamburan balik (dengan energi sinar-X yang umumnya digunakan pada saat itu) dimana dosis 100 mR di udara dapat memberikan dosis 200 mR pada permukaan tubuh.

Karena berkecamuknya Perang Dunia II, maka para anggota Komisi Internasional untuk Perlindungan Sinar-X dan Radium tidak pernah melakukan aktivitas apapun antara tahun 1937 - 1950. Dosis tenggang 1 R/minggu masih tetap bertahan hingga tahun 1950. Komisi kembali aktif dan melakukan pertemuan pada tahun 1950. Pada tahun itu juga Komisi tersebut berubah nama menjadi Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiologi (ICRP). Berbagai perkembangan dalam penelitian radiobiologi dan dosimetri radiasi telah mengantarkan ke arah perubahan dalam teknik penentuan nilai batas dosis, sehingga pertemuan ICRP tahun 1950 itu

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

memutuskan untuk :

1. Menurunkan dosis tenggang menjadi 0,05 R (50 mR) per hari atau 0,3 R (300 mR) per minggu atau 15 R / tahun.
2. Menetapkan kulit sebagai organ kritis dengan dosis tenggangnya sebesar 0,6 R (600 mR) per minggu pada kedalaman 7 mg/cm^2 .

Perkembangan dalam dosimetri radiasi membuktikan bahwa nilai paparan tidak tepat jika digunakan sebagai ukuran untuk menyatakan dosis radiasi pada jaringan. Oleh sebab itu pada tahun 1953 ICRP merekomendasikan untuk mempertimbangkan energi radiasi yang diserap jaringan sebagai dasar untuk menyatakan nilai dosis radiasi. Untuk keperluan ini ICRP memperkenalkan besaran dosis serap dengan satuan rad (*radiation absorbed dose*). Pada tahun 1955 ICRP memperkenalkan konsep dosis ekivalen dengan satuan rem (*roentgen equivalent man*) sebagai satuan untuk menyatakan dosis serap yang sudah dikalikan dengan faktor kualitas dari radiasi bersangkutan. Dengan diperkenalkannya pengertian keefektifan relatif biologi atau relatif biological *effectiveness* (RBE) yang secara numerik ekivalen dengan faktor kualitas suatu radiasi (Q), serta diperkenalkannya dosis ekivalen (H) dan meningkatnya pengetahuan mengenai efek biologi dari radiasi pengion, maka dalam beberapa rekomendasi berikutnya, ICRP selalu menggunakan besaran dosis ekivalen dengan satuan rem untuk menyatakan dosis radiasi.

Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiologi melakukan pertemuan lagi berturut-turut pada tahun 1953 dan 1956. Mengingat telah terjadi perkembangan dan peningkatan pengetahuan yang cukup banyak mengenai efek biologi dari radiasi pada periode selanjutnya, maka ICRP melalui Publikasi ICRP No. 2 tahun 1958 menetapkan dosis tenggang sebesar 0,1 rem/minggu. Sejak saat itu, dosis tenggang disebut sebagai Nilai Batas Rata-rata Tertinggi (NBRT). Biasanya untuk keperluan praktis dianjurkan untuk menggunakan Nilai Batas Rata-rata Tertinggi Tahunan (NBRTT) yang nilainya 5 rem atau 5.000 mrem.

Dari waktu ke waktu, ICRP selalu memperbaiki dan menyempurnakan rekomendasinya mengenai perlindungan terhadap bahaya radiasi. Pembaharuan mengenai konsep nilai batas dosis muncul lagi dengan dikeluarkannya Publikasi ICRP No. 26 tahun 1977. Meskipun dalam Publikasi ini tidak terjadi penurunan Nilai Batas Dosis (tetap 5 rem/tahun untuk pekerja radiasi, dan 0,5 rem/tahun untuk masyarakat), namun ada beberapa

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

perbedaan yang cukup mendasar dibandingkan dengan ketentuan Nilai Batas Dosis yang dikeluarkan sebelumnya.

Rekomendasi ICRP No. 26 Tahun 1977 ini sangat sesuai dengan tujuan utama proteksi radiasi, yaitu mencegah efek non-stokastik dan membatasi peluang terjadinya efek stokastik. Meskipun demikian, Komisi secara berkala memeriksa ulang temuan-temuan yang berkaitan dengan efek biologi radiasi dan metode penentuan resiko kerugian pada kesehatan yang diakibatkannya.

Konsep terbaru mengenai prinsip-prinsip dasar proteksi radiasi telah diperkenalkan dalam Publikasi ICRP No. 60 tahun 1990. Dalam Publikasi ini terdapat beberapa perubahan dibandingkan dengan Publikasi ICRP No. 26 tahun 1977. Salah satu perbedaan antara kedua Publikasi tersebut adalah dalam hal penentuan pembatasan penerimaan dosis radiasi baik untuk pekerja radiasi maupun masyarakat umum bukan pekerja radiasi. Dalam Publikasi tahun 1977 Nilai Batas Dosis efektif untuk pekerja radiasi dan masyarakat berturut-turut adalah 50 mSv/tahun dan 5 mSv/tahun, sedang dalam Publikasi tahun 1990 diturunkan menjadi 20 mSv/tahun untuk pekerja radiasi dan 1 mSv/tahun untuk masyarakat.

Proteksi Terhadap Sumber Eksternal

Meskipun tingkat ancaman bahaya radiasi pada suatu fasilitas nuklir sangat rendah, setiap fasilitas nuklir harus selalu dilengkapi dengan perangkat proteksi radiasi dan keselamatan kerja lainnya sesuai dengan persyaratan dan peraturan yang berlaku. Hal ini dimaksudkan untuk mengupayakan atau menekan hingga sekecil mungkin timbulnya ancaman bahaya radiasi, kontaminasi serta bahaya konvensional lainnya, baik terhadap pekerja maupun masyarakat. Bangunan fasilitas nuklir yang di dalamnya menyimpan bahan radioaktif dirancang sedemikian rupa sehingga bangunan itu mampu mengungkung bahan-bahan radioaktif yang ada di dalamnya.

Kemampuan mengungkung bahan radioaktif tersebut didukung oleh desain sipil seperti gedung serba tertutup, sistem ventilasi yang menerapkan tekanan negatif terhadap tekanan udara luar, serta pola aliran udara ventilasi yang diatur mengalir dari tempat dengan tingkat kontaminasi rendah ke

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

tempat dengan tingkat kontaminasi tinggi. Dengan menggunakan program proteksi radiasi yang disusun dan dikelola secara baik, maka semua kegiatan yang mengandung resiko paparan radiasi cukup tinggi dapat ditangani sedemikian rupa sehingga nilai batas dosis yang telah ditetapkan tidak akan terlampaui. Bahaya radiasi dari sumber-sumber eksterna ini dapat dikendalikan dengan mempergunakan tiga prinsip dasar proteksi radiasi, yaitu pengaturan waktu, pengaturan jarak dan penggunaan perisai radiasi.

Pengaturan Waktu

Seorang pekerja radiasi yang berada di dalam medan radiasi akan menerima dosis radiasi yang besarnya sebanding dengan lamanya pekerja tersebut berada di dalam medan radiasi. Semakin lama seseorang berada di tempat itu, akan semakin besar dosis radiasi yang diterimanya, demikian pula sebaliknya. Dosis radiasi yang diterima oleh pekerja selama berada di dalam medan radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$D = D^* \cdot t$$

dengan :

D = dosis akumulasi yang diterima pekerja

D^* = laju dosis serap dalam medan radiasi

t = lamanya seseorang berada di dalam medan radiasi.

Dalam penggunaan persamaan tersebut satuan untuk D^* dan t harus saling menyesuaikan, misal satuan untuk D^* dalam mGy/menit, maka satuan t harus dalam menit, demikian pula jika D^* dalam $\mu\text{Gy}/\text{detik}$, maka satuan t dalam detik dan sebagainya.

Pengaturan Jarak

Faktor jarak berkaitan erat dengan fluks (ϕ) radiasi. Fluks radiasi pada suatu titik akan berkurang berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara titik tersebut dengan sumber radiasi. Untuk mengetahui pengaruh jarak terhadap fluks radiasi ini, berikut diberikan sumber yang memancarkan radiasi dengan jumlah pancaran S (radiasi/s). Fluks radiasi didefinisikan sebagai jumlah radiasi yang menembus luas permukaan (dalam cm^2) persatuan waktu (s).

Laju dosis radiasi proporsional dengan fluks radiasi, sehingga laju dosis

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

pada suatu titik juga berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik tersebut dengan sumber. Oleh sebab itu, laju dosis di suatu titik berjarak R dari sumber memenuhi persamaan sebagai berikut :

$$D^*_1 : D^*_2 : D^*_3 = \frac{1}{R_1^2} : \frac{1}{R_2^2} : \frac{1}{R_3^2}$$

atau

$$D^*_1 \cdot R_1^2 = D^*_2 \cdot R_2^2 = D^*_3 \cdot R_3^2$$

dengan :

D^* = laju dosis serap pada suatu titik

R = jarak antara titik dengan sumber radiasi

Berdasarkan pada persamaan di atas, maka jika jarak dijadikan dua kali lebih besar, maka laju dosisnya berkurang menjadi $(1/2)^2$ atau $1/4$ kali semula, demikian pula jika jaraknya diubah menjadi 3 dan 4 kali semula, maka laju dosis radiasinya berkurang menjadi $(1/3)^2$ atau $1/9$ dan $(1/4)^2$ atau $1/16$ kali semula. Sebaliknya, jika jarak antara titik dengan sumber radiasi diperpendek menjadi $1/2$ kali semula, maka laju dosisnya akan bertambah menjadi 4 kali semula. Demikian pula jika jaraknya diubah menjadi $1/3$ dan $1/4$ kali semula, maka laju dosisnya bertambah menjadi 9 dan 16 kali semula.

Penggunaan Perisai Radiasi

Untuk penanganan sumber-sumber radiasi dengan aktivitas sangat tinggi (ber orde MBq atau Ci), seringkali pengaturan waktu dan jarak kerja tidak mampu menekan penerimaan dosis oleh pekerja di bawah nilai batas dosis yang telah ditetapkan. Oleh sebab itu, dalam penanganan sumber-sumber beraktivitas tinggi ini juga diperlukan perisai radiasi. Sifat dari bahan perisai radiasi ini harus mampu menyerap energi radiasi (untuk sinar beta dan neutron) atau melemahkan intensitas radiasi (untuk sinar-X dan gamma). Perisai radiasi gamma secara kualitatif maupun kuantitatif berbeda dengan perisai untuk sinar beta maupun neutron.

Sedang potensi sinar alpha sebagai sumber radiasi eksterna dapat diabaikan. Mengingat sifat serap bahan perisai terhadap berbagai jenis dan energi radiasi berbeda-beda, jumlah dan jenis bahan penahan radiasi yang diperlukan bergantung pada jenis dan energi radiasi dari sumber. Interaksi

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

antara radiasi elektromagnetik dengan materi menyebabkan pengurangan intensitas radiasi elektromagnetik seperti ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$I = I_o e^{-\mu x}$$

Laju dosis radiasi elektromagnetik berbanding lurus dengan intensitas radiasinya, sehingga dalam pembahasan mengenai perisai radiasi elektromagnetik ini berlaku persamaan baru yang diturunkan dari persamaan di atas, yaitu :

$$D = D^* e^{-\mu x}$$

dengan :

D^* = laju dosis radiasi elektromagnetik setelah melalui bahan perisai

D^* = laju dosis radiasi elektromagnetik sebelum melalui bahan perisai

μ = koefisien absobsi linier bahan perisai terhadap radiasi elektromagnetik

x = tebal perisai

Dimensi untuk μ adalah L^{-1} , dan dimensi untuk x adalah L. Karena $\mu \cdot x$ tidak berdimensi, maka satuan untuk μ dan x harus saling menyesuaikan, misal μ dalam cm^{-1} maka x dalam cm, jika μ dalam mm^{-1} maka x dalam mm dan sebagainya.

Dalam pembahasan perisai untuk radiasi elektromagnetik ini berlaku juga konsep nilai tebal paro atau *half value thickness* (HVT) dan *tenth value thickness* (TVT). Nilai HVT untuk perisai radiasi tertentu adalah tebal bahan perisai yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi elektromagnetik menjadi setengah dari intensitas sebelum dilemahkan oleh perisai atau setengah dari intensitas mula-mula. Nilai HVT suatu bahan dapat ditentukan melalui penurunan persamaan sebagai berikut :

$$I = I_o e^{-\mu x}$$

Jika $x = HVT$ maka $I = 1/2 I_o$, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$1/2 I_o = I_o e^{-\mu \cdot HVT}$$

$$1/2 = e^{-\mu \cdot HVT} \quad \text{atau} \quad \ln \frac{1}{2} = -\mu \cdot HVT$$

$$HVT = \frac{0,693}{\mu}$$

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Nilai untuk μ dan HVT bergantung pada jenis bahan penahan radiasi dan energi dari radiasi elektromagnetik yang diserap bahan tersebut.

Konsep HVT ini sangat berguna untuk menghitung secara cepat tebal perisai radiasi yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi hingga level tertentu. Misal untuk mengurangi intensitas radiasi elektromagnetik menjadi $1/2$ dari intensitas semula diperlukan perisai radiasi setebal 1 HVT, untuk mengurangi intensitas menjadi $1/4$ atau $(1/2)^2$ dari intensitas semula diperlukan perisai setebal 2 HVT, untuk mengurangi intensitas menjadi $1/8$ atau $(1/2)^3$ dari intensitas semula diperlukan perisai setebal 3 HVT dan seterusnya.

Seringkali dalam pemanfaatan perisai radiasi juga digunakan nilai tebal sepersepuluh atau *tenth value thickness* (TVT), yaitu tebal bahan perisai yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi elektromagnetik menjadi $1/10$ dari intensitas semula. Sebagaimana konsep HVT, konsep TVT ini juga dimaksudkan untuk menghitung secara cepat tebal perisai radiasi yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi hingga level tertentu.

Bedanya dengan HVT adalah bahwa dengan TVT ini intensitas radiasinya berkurang dengan kelipatan $1/10$. Misal untuk mengurangi intensitas radiasi elektromagnetik menjadi $1/10$ dari intensitas semula diperlukan perisai radiasi setebal 1 TVT, untuk mengurangi intensitas menjadi $1/100$ atau $(1/10)^2$ dari intensitas semula diperlukan perisai setebal 2 TVT, untuk mengurangi intensitas menjadi $1/1000$ atau $(1/10)^3$ dari intensitas semula diperlukan perisai setebal 3 TVT dan seterusnya.

Sebagaimana nilai HVT, nilai TVT suatu bahan perisai juga dapat ditentukan melalui penurunan berikut :

$$I = I_o e^{-\mu x}$$

Jika $x = \text{TVT}$ maka $I = 1/10 I_o$ sehingga persamaan di atas menjadi :

$$1/10 I_o = I_o e^{-\mu \cdot \text{TVT}}$$

$$1/10 = e^{-\mu \cdot \text{TVT}} \quad \text{atau} \quad \ln \frac{1}{10} = -\mu \cdot \text{TVT}$$

$$\text{TVT} = \frac{2,303}{\mu}$$

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Berkenaan dengan konsep HVT ini maka penurunan intensitas radiasi elektromagnetik dapat pula dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_o = I_o \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

dengan $n = x / HVT$. Sedang untuk TVT perumusannya adalah :

$$I_o = I_o \left(\frac{1}{10}\right)^m$$

dengan $m = x / TVT$

gambar 140.
Pemeriksaan
kontaminasi
tangan dan kaki
setelah bekerja
dengan sumber
terbuka
(sumber : JAERI)

Pelemahkan radiasi elektromagnetik secara kuantitatif berbeda dengan pelemahkan sinar beta. Sinar beta mempunyai jangkauan tertentu dan energinya dapat diserap seluruhnya oleh medium yang dilaluinya. Sedang radiasi elektromagnetik hanya dapat dikurangi intensitasnya bila perisai untuk radiasi ini dipertebal. Kemampuan bahan perisai dalam menyerap radiasi elektromagnetik ditentukan oleh nilai μ bahan tersebut. Semakin tinggi nomor atom bahan semakin besar nilai μ -nya, sehingga semakin baik dipakai sebagai bahan perisai untuk radiasi elektromagnetik. Bahan yang umum dipakai untuk perisai radiasi elektromagnetik ini adalah timbal, tembaga, beton dan lain-lain.



Untuk perencanaan program proteksi radiasi, sering kali pekerja dituntut untuk mengetahui laju dosis dari suatu sumber. Laju dosis radiasi pada suatu tempat kerja yang berasal dari sumber eksterna biasanya diketahui melalui pengukuran menggunakan alat ukur radiasi (*surveymeter*). Alat ini dapat secara langsung menunjukkan tingkat laju dosis (baik dosis serap, dosis ekivalen maupun paparan) di tempat yang diukur. Namun demikian, untuk keperluan proteksi radiasi, dalam berbagai keadaan seringkali pekerja dituntut untuk dapat bertindak cepat dan tidak harus mengandalkan pada alat ukur radiasi. Dalam keadaan seperti ini, radiasi yang perlu mendapatkan prioritas utama adalah jenis radiasi eksterna berdaya tembus tinggi, seperti sinar gamma.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Pengawasan Dalam Pemanfaatan Teknik Nuklir

Seiring perkembangan pemanfaatan nuklir internasional, persyaratan yang harus dikuasai negara tetap dipertahankan. Pemerintah tetap diminta untuk melakukan pengawasan agar tidak terjadi penyimpangan dari tujuan pemanfaatan bahan nuklir tersebut. Dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, wewenang pelaksanaan dan pengawasan dipisahkan dalam dua Lembaga yang berbeda untuk menghindari tumpang tindih kegiatan pemanfaatan dan pengawasan dan sekaligus mengoptimalkan pengawasan yang ditujukan untuk lebih meningkatkan keselamatan nuklir.

Ada dua istilah yang perlu didefinisikan terlebih dahulu sebelum membahas lebih lanjut mengenai pengawasan dalam pemanfaatan tenaga nuklir, kedua istilah itu adalah tenaga nuklir dan pemanfaatan. Dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran disebutkan bahwa yang dimaksud dengan tenaga nuklir adalah tenaga dalam bentuk apapun yang dibebaskan dalam proses transformasi inti, termasuk tenaga yang berasal dari sumber radiasi pengion. Sedang pemanfaatan dididefinisikan sebagai kegiatan yang berkaitan dengan tenaga nuklir yang meliputi penelitian, pengembangan, penambangan, pembuatan, produksi, pengangkutan, penyimpanan, pengalihan, ekspor, impor, penggunaan, dekomisioning, dan pengelolaan limbah radioaktif untuk meningkatkan kesejahteraan rakyat. Sesuai dengan Undang-Undang tersebut, pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir ini dilakukan oleh Badan Pengawas yang berada di bawah dan bertanggung jawab langsung kepada presiden, yang bertugas melaksanakan pengawasan terhadap segala kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir. Untuk Indonesia, pengawasan ini dilaksanakan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).

Pemanfaatan tenaga nuklir mengandung risiko radiologis yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Untuk mencegah atau mengurangi risiko bahaya tersebut, maka ada berbagai upaya yang harus dilakukan. Dalam hal ini dikenal adanya aspek legal dan teknis yang harus ditempuh untuk mengupayakan sistem keselamatan radiasi yang optimum, baik bagi pekerja radiasi maupun masyarakat umum. Jika sebelumnya sudah dibahas berbagai aspek teknis berkaitan dengan penggunaan teknik nuklir, pada bagian ini akan dibahas aspek legal yang berkaitan dengan penggunaan tenaga nuklir di Indonesia.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Pengaturan, Perizinan dan Inspeksi

Ditinjau dari aspek legalnya, pemanfaatan tenaga nuklir dalam berbagai bidang memerlukan adanya sistem pengawasan yang dilakukan oleh pemerintah (BAPETEN), yang dalam hal ini bertindak sebagai Instansi Yang Berwenang dalam melakukan pengawasan tersebut. Aspek legal menyangkut berbagai peraturan perundangan serta peraturan pelaksanaannya, yang merupakan dasar dari suatu sistem pengawasan yang diberlakukan. Pengertian dari pengawasan dalam hal ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu : pengaturan, perizinan dan inspeksi. Obyek pengawasan ini terutama berupa zat radioaktif atau sumber radiasi lainnya, bahan nuklir dan reaktor nuklir. Namun pelaksanaan pengawasan ini tidak hanya dilakukan terhadap objeknya saja, melainkan melebar terhadap sarana, peralatan dan bahkan terhadap personil yang bekerja dengan radiasi.

Pengawasan yang efektif biasanya didukung oleh kemampuan untuk memaksakan. Namun karena pemakaian ini dapat melanggar hak orang lain, maka kewenangan pengawasan itu harus mempunyai dasar hukum. Pengawasan tanpa dasar hukum merupakan tindakan sewenang-wenang yang harus dihindari. Pengaturan pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir dilaksanakan dengan cara mengeluarkan peraturan sesuai dengan hirarki atau tata pertingkatan peraturan. Jadi dalam hal ini pengawasan hanya bisa dilakukan atas dasar peraturan yang sudah ditetapkan terlebih dahulu.

Mengenai pengaturan, BAPETEN dituntut untuk membuat peraturan sedemikian rupa sehingga pemanfaatan teknologi nuklir dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya dengan risiko yang sekecil-kecilnya. Di lain fihak, masyarakat pemakai tenaga nuklir dituntut untuk mentaati seluruh peraturan keselamatan yang telah digariskan. Pelanggaran atas peraturan tersebut merupakan tindak pidana yang dapat dikenakan sangsi hukuman.

Setiap pemanfaatan tenaga nuklir harus dilengkapi dengan izin dari Instansi Yang Berwenang. Sistem perizinan itu nampak universal sifatnya, semua negara menempuh jalan ini dalam melaksanakan pengawasan pemanfaatan teknologi nuklir di negara masing-masing. Kemungkinan perbedaan terdapat pada instansi yang diberi kewenangan untuk menangani perizinan tersebut. Belgia, Denmark, Perancis dan Swiss membuat aturan bahwa perizinan untuk pemakaian tenaga nuklir di bidang kesehatan tidak ditangani oleh Komisi Tenaga Atom, melainkan oleh Menteri Kesehatan. Sedang di Belanda, sistem

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

perizinan ditangani oleh Menteri Urusan Ekonomi dan Menteri Urusan Sosial dan Kesehatan Masyarakat. *Nuclear Regulatory Commission* di Amerika Serikat melakukan pengawasan terhadap bahan nuklir khusus, bahan sumber dan zat radioaktif hasil samping serta mengawasi pembangunan dan pengoperasian instalasi nuklir tertentu. Di Indonesia, masalah perizinan ini sebelumnya ditangani oleh Badan Tenaga Atom Nasional cq. Biro Pengawasan Tenaga Atom. Namun dengan dikeluarkannya UU No. 10/1997, perizinan ini ditangani oleh Badan Pengawas dalam hal ini BAPETEN.

Dalam rangka pemberian izin ini diperlukan pertimbangan tertentu agar pekerja dan anggota masyarakat lainnya mendapatkan perlindungan dari bahaya radiasi dari instalasi yang diberi izin operasi. Pemegang izin diwajibkan untuk memberi kesempatan pemeriksaan kesehatan tenaga kerja oleh tenaga-tenaga ahli dari Instansi Yang Berwenang atau dengan kerja sama dengan Instansi Pemerintah lainnya untuk menilai efek-efek radiasi terhadap kesehatan pekerja. Pemegang izin juga diwajibkan untuk mentaati peraturan, pedoman kerja dan lain-lain ketentuan yang dikeluarkan oleh Pemerintah maupun Instansi Yang Berwenang. Pelanggaran terhadap ketentuan-ketentuan tersebut dapat mengakibatkan dicabutnya izin yang telah diberikan. Pencabutan ini baru dilakukan setelah didahului adanya peringatan kepada pemegang izin bahwa persyaratan perizinan tidak lagi dipenuhi atau tidak memenuhi kewajiban yang ditentukan dalam Peraturan Pemerintah.

Pemegang izin diwajibkan pula menyelenggarakan dokumentasi segala sesuatu yang berkaitan dengan zat radioaktif dan/atau sumber radiasi lainnya. Tujuan utama dari sistem perizinan ini adalah :

1. Untuk mengetahui di mana saja kegiatan nuklir dilaksanakan, agar kegiatan tersebut dapat diawasi dan dipantau sehingga tidak timbul dampak negatif ditinjau dari segi keselamatannya.
2. Untuk mengetahui apakah pemohon izin benar-benar mampu melaksanakan dengan aman mengenai kegiatan yang direncanakannya.

Program perizinan untuk suatu instalasi nuklir idealnya mencakup tiga tahap, yaitu : izin tapak, izin konstruksi dan izin operasi. Dengan sistem ini, Instansi Yang Berwenang memberi izin sudah mulai dilibatkan sejak awal, jauh sebelum kegiatan operasionalnya dimulai. Dalam sistem perizinan yang menyangkut izin operasi, ada tiga syarat yang harus dipenuhi oleh suatu

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

unit kerja agar permohonan izinnya dikabulkan, yaitu :

1. Tersedianya fasilitas yang baik dan memenuhi syarat sesuai dengan ruang lingkup kegiatannya.
2. Memiliki tenaga kerja yang cakap dan terlatih baik.
3. Memiliki peralatan yang memadai untuk menjamin tercapainya keselamatan kerja terhadap radiasi, baik di dalam maupun di luar lingkungannya.

Perizinan sebagai salah satu bagian dari pengawasan tidak hanya mencakup izin operasi saja. Di samping fasilitasnya sendiri, personil yang terlibat dalam pemanfaatan tenaga nuklir juga dituntut memiliki kecakapan dan latihan yang memadai. Dalam beberapa kasus, Surat Ijin Bekerja (SIB) bagi personil yang terlibat juga diperlukan, misal SIB sebagai Petugas Proteksi Radiasi, Ahli Radiografi, Operator Radiografi, Supervisor Reaktor dan Operator Reaktor. Perizinan diperlukan juga pada personil yang bekerja di irradiator dalam bentuk perberlakuan SIB untuk pekerja irradiator yang dibedakan atas empat macam pekerja, yaitu : Operator Irradiator, Petugas Dosimetri, Petugas Proteksi Radiasi dan Petugas Perawatan.

Adanya tenaga-tenaga yang cakap seringkali harus dibuktikan melalui ujian. Tenaga kerja yang lulus ujian akan diberikan tanda lulus berupa SIB yang berlaku untuk jangka waktu tertentu, misal selama lima tahun. Apabila masa berlakunya SIB tersebut telah habis, maka pekerja yang bersangkutan harus menempuh ujian ulang. Artinya petugas-petugas tersebut secara periodik harus menjalani program rekualifikasi untuk mengetahui apakah mereka masih memenuhi syarat dalam menjalankan tugasnya. Setiap instalasi atom harus memiliki paling tidak seorang Petugas Proteksi Radiasi (PPR). PPR adalah petugas yang oleh Instansi Yang Berwenang dinyatakan mampu melaksanakan pekerjaan yang berkaitan dengan masalah proteksi radiasi yang dibuktikan melalui ujian.

Inspeksi merupakan tonggak terakhir dari rangkaian sistem pengawasan dalam pemanfaatan teknologi nuklir. Inspeksi juga merupakan bentuk nyata pengawasan, berupa kedatangan seorang atau lebih inspektur yang memeriksa apakah keadaan pelaksanaan di tempat kerja sesuai dengan peraturan, petunjuk atau pedoman yang berlaku yang telah dikeluarkan terlebih dahulu. Inspektur tersebut diangkat dan diberhentikan oleh Badan Pengawas. Tujuan dari inspeksi ini adalah agar setiap kegiatan yang

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

memanfaatkan teknologi nuklir dilaksanakan sebagaimana mestinya sesuai dengan peraturan, petunjuk dan pedoman kerja yang telah digariskan. Inspeksi terhadap instalasi nuklir dilaksanakan secara berkala dan sewaktu-waktu.

Inspeksi dilakukan untuk membuktikan bahwa pemanfaatan teknologi nuklir dilakukan dengan mematuhi norma-norma yang menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja, masyarakat dan lingkungan. Inspeksi ini dimaksudkan pula untuk menemukan adanya pelanggaran terhadap peraturan perundang-undangan yang berlaku. Dalam hal ditemui adanya pelanggaran, maka kasusnya diserahkan kepada pihak yang berwajib untuk diproses lebih lanjut. Bagaimanapun juga, inspeksi ini mempunyai peran penting dalam menunjukkan diri bahwa peraturan atau perizinan yang dikeluarkan itu akan diperiksa kesesuaianya dengan keadaan di lapangan. Usaha memantapkan sistem pengawasan perlu terus dilakukan untuk mengikuti kondisi pemanfaatan teknologi nuklir yang terus berkembang.

Di samping memberikan manfaat yang sangat besar, tenaga nuklir juga mempunyai potensi bahaya radiasi baik terhadap pekerja, anggota masyarakat maupun lingkungan. Oleh sebab itu, pemanfaatan tenaga nuklir harus mendapat pengawasan yang cermat agar selalu mengikuti segala ketentuan di bidang keselamatan tenaga nuklir sehingga pemanfaatannya tidak menimbulkan bahaya radiasi. Pengawasan tersebut dilaksanakan dengan cara sebagai berikut :

1. Mengeluarkan peraturan di bidang keselamatan nuklir agar tujuan pengawasan tercapai.
2. Menyelenggarakan perizinan untuk mengendalikan bahwa pemanfaatan tenaga nuklir akan dilakukan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dengan perizinan ini Badan Pengawas dapat mengetahui dimana, oleh siapa, dan bagaimana pemanfaatan tenaga nuklir dilakukan.
3. Melaksanakan inspeksi secara berkala dan sewaktu-waktu untuk mengetahui apakah pemanfaatan tenaga nuklir mengikuti peraturan yang ditetapkan.

Badan Pengawas juga diberi tugas untuk melakukan pembinaan berupa bimbingan dan penyuluhan dalam pemanfaatan tenaga nuklir. Pembinaan dan pengembangan kemampuan sumber daya manusia adalah syarat

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

mutlak dalam rangka mendukung upaya pemanfaatan tenaga nuklir dan pengawasan sehingga pemanfaatan tenaga nuklir benar-benar meningkatkan kesejahteraan rakyat dengan tingkat keselamatan yang tinggi. Pembinaan dan pengembangan ini dilakukan juga untuk meningkatkan disiplin dalam mengoperasikan instalasi nuklir dan menumbuh-kembangkan budaya keselamatan, yaitu sikap dalam organisasi dan individu yang menekankan pentingnya keselamatan. Oleh karena itu, budaya keselamatan mempersyaratkan agar semua kewajiban yang berkaitan dengan keselamatan harus dilaksanakan secara benar, seksama, dan penuh rasa tanggung jawab.

Pengawasan Internasional

Bahan nuklir juga memiliki aspek politis dan strategis, sehingga kegiatan yang memanfaatkan bahan nuklir perlu mendapatkan pengawasan dan pengendalian. Secara garis besar, sistem pengawasan yang berkaitan dengan pemanfaatan bahan nuklir ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu pengawasan tingkat nasional oleh masing-masing pemerintah dalam suatu negara, dan pengawasan internasional oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA).

Sukses "Proyek Manhattan" dalam mengembangkan dan memproduksi bom nuklir, diikuti oleh penggunaan senjata nuklir dalam Perang Dunia II dengan diledakkannya dua bom nuklir di Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945, telah menyadarkan penduduk bumi mengenai bencana yang dapat ditimbulkan dari adanya perlombaan, pengembangan dan penyebaran senjata nuklir. Apabila semua negara di dunia ini diberi kebebasan untuk mengembangkan dan memiliki senjata nuklir, bisa dibayangkan ancaman bahaya yang sewaktu-waktu dapat menimpas bumi beserta seluruh isinya.

Untuk menghindari terjadinya pengembangan senjata nuklir tersebut, pada tahun 1957, Komisi Tenaga Atom Internasional dibentuk untuk mengawasi dan mengatur pengembangan serta perluasan teknologi dan bahan nuklir. Dua tahun kemudian suatu perjanjian dirundingkan dalam rangka demiliterisasi benua Antartika dan melarang peledakan atau penyimpanan senjata nuklir di sana. Amerika Serikat dan Uni Sovyet (waktu itu) menandatangani perjanjian tersebut. Sedang pada tahun 1961, Sidang Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa meloloskan pernyataan bersama mengenai prinsip-prinsip yang telah disetujui untuk perjanjian perlucutan senjata, diikuti pada tahun

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

1963 dengan perjanjian yang mengikat Amerika Serikat, Inggris dan Uni Sovyet untuk tidak melakukan percobaan senjata nuklir di daratan, atmosfer dan bawah laut. Pada tahun 1967, muncul perjanjian lain antara beberapa negara dalam rangka membatasi penggunaan ruang angkasa untuk kepentingan mata-mata militer.

Atas inisiatif beberapa negara melalui Perserikatan Bangsa-Bangsa, lahirlah suatu hasil persetujuan terpenting dalam rangka mengontrol penyebaran senjata nuklir. Persetujuan tersebut adalah Perjanjian Anti Penyebaran Senjata Nuklir atau lebih dikenal dengan NPT (Treaty on The Non-Proliferation of Nuclear Weapons). Isi pokok dari perjanjian yang dicetuskan pada tahun 1968 itu adalah :

1. Negara-negara yang memiliki senjata nuklir (negara nuklir) tidak diperkenankan menjual, memberikan maupun membantu mengembangkan senjata nuklir dengan dalih apapun kepada negara-negara yang tidak atau belum memiliki senjata nuklir (negara non nuklir).
2. Negara-negara non-nuklir tidak diperkenankan membuat atau menerima senjata nuklir dengan alasan apapun.

Hingga kini, beberapa negara nuklir seperti Amerika Serikat, Uni Sovyet saat ini Rusia dan Inggris bersama-sama lebih dari 178 negara non-nuklir ikut serta menandatangani naskah NPT tersebut. Untuk memantau perkembangan program nuklir di masing-masing negara anggota NPT, para penandatangan melakukan pertemuan lima tahunan. Di antara negara-negara non-nuklir, ada beberapa negara seperti India, Pakistan, Brasil, Argentina dan Afrika Utara merupakan negara yang berpotensi memiliki senjata nuklir. Negara-negara tersebut sejak semula telah menolak bergabung untuk menandatangani naskah NPT. Dua negara nuklir yaitu Republik Rakyat Cina dan Perancis juga menolak untuk menandatangani naskah NPT.

Pengawasan pemanfaatan teknologi nuklir secara internasional dilakukan oleh IAEA, yaitu suatu organisasi antar pemerintah yang didirikan pada tahun 1957 dan bernaung di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa. Organisasi itu sendiri dibentuk dalam rangka mempercepat dan memperluas kontribusi tenaga nuklir untuk maksud-maksud damai, kesehatan dan kesejahteraan bangsa-bangsa di seluruh dunia. Dalam kiprahnya, IAEA selalu membantu negara-negara anggota, terutama negara-negara berkembang, dengan

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

memberikan fasilitas dan beasiswa untuk latihan dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir.

Pengawasan internasional yang dilakukan oleh IAEA lebih bersifat memantau kemungkinan diselewengkannya bahan nuklir tersebut di luar maksud-maksud damai. Istilah yang digunakan oleh IAEA untuk mengawasi penggunaan bahan nuklir adalah safeguards. Adapun bahan-bahan nuklir yang dibawah pengawasan safeguards IAEA adalah :

1. Bahan dapat belah khusus terutama plutonium dan uranium (Pu-239, U-235 dan U-233)
2. Uranium yang mengandung campuran isotop secara alami, uranium yang kadar U-235 nya susut (uranium susut kadar) dan thorium.

Nilai strategis dan politis dari bahan nuklir mendorong perlunya diterapkan sistem proteksi fisik terhadap bahan tersebut. Penerapan sistem ini dapat dipakai untuk mencegah jatuhnya bahan nuklir tersebut ke tangan pihak yang tidak bertanggung jawab, seperti :

1. Penjahat, teroris serta kelompok revolusioner.
2. Pemerintah atau negara yang mungkin akan menyalah gunakan bahan nuklir dengan mengalihkan tujuan pemakaian dari untuk maksud damai ke pembuatan senjata nuklir.

Dalam rangka pelaksanaan safeguards tadi, pemerintah dalam suatu negara anggota NPT wajibkan kepada penanggung jawab instalasi nuklir (sekaligus sebagai penanggung jawab bahan nuklir) untuk melaksanakan proteksi fisik yang ketat, dan melaksanakan peraturan pembukuan bahan nuklir serta melaporkan kepada yang berwenang atas setiap impor dan ekspor bahan nuklir. Sistem pelaporan ini dimaksudkan untuk mencegah terjadinya pencurian, kehilangan atau penyalah gunaan bahan nuklir dengan sengaja. Di samping itu, pemerintah juga secara rutin melakukan inspeksi bahan nuklir pada setiap instansi yang menggunakan bahan tersebut.

Sebagai konsekwensi keikutsertaan suatu negara dalam menandatangani naskah NPT, Badan Tenaga Atom Internasional juga melakukan inspeksi untuk meyakinkan bahwa suatu negara tidak menggunakan bahan nuklir untuk kegiatan yang menyimpang dari maksud damai, misal untuk pembuatan senjata nuklir atau bahan peledak lainnya. Ruang lingkup inspeksi ini meliputi reaktor nuklir dan bahan nuklir, zat radioaktif dan/atau

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

sumber radiasi lainnya. Menurut perjanjian bilateral antara negara anggota NPT dengan IAEA sebagai pelaksana NPT itu, maka suatu negara harus mempunyai apa yang disebut SSAC (State System of Accounting for and Control of Nuclear Material). Berdasarkan perjanjian ini, inspektur dari IAEA akan mengadakan inspeksi secara rutin terhadap pemakaian bahan nuklir di fasilitas-fasilitas nuklir suatu negara

9.2

Proteksi Radiasi pada Lingkungan

Untuk memantau adanya radiasi pengion, manusia memerlukan instrumentasi khusus yang peka terhadap berbagai jenis radiasi. Untuk keperluan tersebut, kini telah banyak diperkenalkan berbagai jenis instrumentasi radiasi yang dapat dipakai untuk berbagai keperluan. Dalam pemanfaatan teknologi nuklir, instrumentasi radiasi ini memegang peranan yang sangat penting, baik untuk keperluan proteksi radiasi maupun dosimetri radiasi. Dalam proteksi radiasi, instrumentasi radiasi dimanfaatkan untuk pemantauan radiasi yang meliputi pemantauan personil pekerja radiasi maupun pemantauan radiasi dan radioaktivitas lingkungan.

Untuk keperluan proteksi radiasi diperlukan adanya pemantauan radiasi dan radioaktivitas lingkungan. Pemantauan radiasi dimaksudkan untuk mengetahui secara langsung tingkat radiasi pada suatu daerah kerja, sedang pemantauan radioaktivitas lingkungan dimaksudkan untuk mengetahui tingkat kontaminasi radioaktif baik di daerah kerja maupun lingkungan di sekitar kawasan instalasi nuklir. Instrumentasi radiasi untuk pemantauan radiasi dan radioaktivitas lingkungan ini secara garis besar dapat dikelompokkan ke dalam tiga jenis penggunaan, yaitu :

1. Surveymeter radiasi yang dipakai untuk mengukur tingkat radiasi dan biasanya memberikan data hasil pengukuran dalam laju dosis (dosis radiasi persatuan waktu).
2. Surveymeter kontaminasi permukaan yang dipakai untuk mengukur tingkat kontaminasi radioaktif pada suatu permukaan dan biasanya memberikan data dalam bentuk hasil cacahan per satuan waktu. Data ini dapat diolah lebih lanjut dan dikonversikan menjadi tingkat kontaminasi persatuan luas.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

3. Alat cacaht radiasi yang dipakai untuk mengukur aktivitas zat radioaktif dan memberikan data hasil pengukuran dalam bentuk cacaht persatuan waktu. Penggunaan yang paling umum adalah untuk mengukur kandungan zat radioaktif dalam suatu bahan. Data hasil cacaht tersebut dapat diolah lebih lanjut sehingga diperoleh hasil pengukuran dalam bentuk aktivitas per satuan berat atau volume bahan, misal dalam Becquerel per gram (Bq/gr), Bq/m³ dan sebagainya.

Surveymeter Radiasi

gambar 141.
Surveymeter
untuk
pemantauan
radiasi daerah
kerja (sumber :
JAERI)

Surveymeter radiasi memegang peranan yang sangat penting dalam setiap kegiatan yang memanfaatkan radiasi. Dengan alat ini setiap pekerja dapat mengetahui tingkat radiasi di tempat kerja dan dapat mengambil tindakan yang paling tepat untuk menghindari penerimaan dosis yang berlebihan. Pemantauan radiasi dapat dilakukan secara langsung karena pada umumnya alat ukur radiasi memberikan hasil pengukuran tingkat radiasi secara langsung dalam bentuk laju paparan maupun dosis ekivalen. Pemantauan radiasi pada prinsipnya adalah kegiatan pengukuran tingkat radiasi di daerah kerja, biasanya dinyatakan dalam laju dosis radiasi per satuan waktu, misal dalam milirem per jam (mrem/jam), mikro Sievert per jam (μ Sv/jam) dan sebagainya. Dalam kegiatan ini digunakan alat ukur radiasi atau lebih sering dikenal dengan surveymeter radiasi. Tingkat laju dosis radiasi pada suatu daerah yang diukur dapat diketahui melalui skala penunjukan baik oleh jarum penunjuk maupun bacaan digital pada alat itu. Sebagian besar surveymeter yang ada saat ini dirancang mampu mendeteksi sinar-X/gamma maupun beta.



Setiap surveymeter radiasi mempunyai pemantau yang mampu mengenali adanya radiasi. Untuk mengukur besarnya tanggapan yang terjadi,

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

surveymeter juga dilengkapi dengan rangkaian elektronik yang mampu memberikan sinyal masukan pada rangkaian pembaca (meter). Oleh rangkaian pembaca sinyal tersebut ditampilkan dalam bentuk angka-angka hasil pengukuran radiasi yang selanjutnya dapat diubah dengan faktor konversi tertentu menjadi angka-angka hasil bacaan tingkat radiasi yang diterima surveymeter. Ada berbagai jenis surveymeter radiasi yang dirancang untuk maksud-maksud penggunaan tertentu. Adakalanya surveymeter tersebut dapat memberikan hasil pengukuran dalam bentuk paparan radiasi per satuan waktu, misal dalam mili Roentgen per jam (mR/jam). Ada pula yang memberikan hasil pengukuran dalam bentuk dosis serap per satuan waktu, misal dalam milirad per jam (mrad/jam) atau mikro Gray per jam (μ Gy/jam) dan sebagainya.

Jenis bahan pemantau yang digunakan pada surveymeter bervariasi bergantung pada tujuan penggunaannya. Pemantau jenis pencacah Geiger-Muller dan pemantau sintilasi NaI(Tl) mempunyai kepekaan yang cukup tinggi terhadap radiasi sehingga dapat digunakan untuk pemantauan di daerah yang laju dosis radiasinya rendah. Surveymeter yang menggunakan pemantau jenis kamar pengionan digunakan pada daerah yang laju dosis radiasinya tinggi. Sering kali surveymeter radiasi juga dilengkapi dengan sistem yang dapat mengeluarkan suara peringatan (alarm) jika radiasi yang terukur relatif tinggi melampaui batas-batas tertentu. Sistem suara peringatan ini dimaksudkan untuk mempermudah dalam pemantauan radiasi di lapangan karena dapat memberi peringatan dini jika radiasi di daerah itu cukup tinggi.

Potensi radiasi beta sebagai sumber radiasi eksterna sering kali dapat diabaikan, terutama untuk radiasi beta berenergi rendah. Namun untuk radiasi beta berenergi tinggi, misal yang dipancarkan oleh sumber stronium-90 (Sr-90), keberadaannya sering kali juga perlu mendapatkan perhatian. Oleh sebab itu, untuk kondisi-kondisi tertentu, pemantauan radiasi beta ini perlu juga dilakukan. Pemantauan radiasi beta dapat dilakukan dengan surveymeter baik yang menggunakan pemantau kamar pengionan maupun pencacah Geiger-Muller yang dilengkapi dengan sistem jendela. Beberapa jenis surveymeter dirancang memiliki jendela yang dapat dibuka maupun ditutup dengan cara menggeser maupun mencopot tutup jendela tersebut disesuaikan dengan kebutuhan.

Pada saat jendela dibuka, maka radiasi beta dapat mencapai pemantau.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Sebaliknya, pada saat jendela ditutup, maka radiasi beta akan tertahan oleh tutup jendela sehingga tidak dapat mencapai pemantau. Dengan cara itu surveymeter dapat dimanfaatkan untuk pemantauan di medan radiasi campuran beta dan sinar-X/gamma. Pada saat jendela ditutup, maka hanya sinar-X/gamma saja yang terukur oleh pemantau. Sedang pada saat jendela dibuka, sinar beta dan sinar-X/gamma akan terukur semuanya. Dengan demikian, selisih nilai dari kedua cara pengukuran itu merupakan nilai hasil pengukuran radiasi beta.

Dikaitkan dengan jenis radiasi pengion yang perlu dipantau, ada jenis surveymeter radiasi yang hanya mampu memantau satu jenis radiasi saja, misal untuk memantau laju dosis sinar-X/gamma, beta maupun neutron. Namun beberapa jenis alat pantau yang ada saat ini dirancang sedemikian rupa sehingga mampu memantau lebih dari satu jenis radiasi.

Neutron Rem Meter

Salah satu alat yang dapat secara langsung mengukur laju dosis ekivalen dari neutron adalah neutron rem meter. Alat ini umumnya digunakan untuk pemantauan neutron di reaktor nuklir dan dapat dipasang secara tetap (*fix monitor*) maupun dibawa atau dipindah-pindah (*portable monitor*). Pengembangan alat pantau neutron saat ini ditekankan pada neutron rem meter, karena alat ini mampu mengukur dosis jaringan pada daerah energi neutron yang sangat luas dari termik hingga kira-kira 15 MeV. Alat ini dilengkapi dengan polietilen berbentuk silinder yang mampu memperlambat neutron cepat melalui tumbukan elastis.

Polietilen dengan ketebalan beberapa centimeter mampu memoderasi neutron cepat sehingga berubah menjadi neutron termik yang dapat berinteraksi dengan bahan pemantau BF_3 atau pemendar $\text{Li}(\text{Eu})$. Alat ini juga dilengkapi dengan pencacah rem yang secara otomatis dapat mengkonversikan hasil cacahan neutron menjadi laju dosis ekivalen neutron dalam rem (*Roentgen equivalent man*). Namun untuk penggunaan di lapangan, alat ini dapat dikatakan kurang portabel karena beratnya mencapai sekitar 20 kg.

Alat pantau proporsional BF_3 dapat dipakai untuk membedakan antara laju dosis neutron termik dan neutron cepat di medan radiasi neutron campuran

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

dengan memodifikasi teknik pengukuran sebagai berikut :

1. Jika pemantau BF_3 dipakai untuk pengukuran langsung (tanpa moderator), maka yang akan terpantau hanyalah laju dosis neutron termik saja.
2. Jika pemantau BF_3 dimasukkan ke dalam moderator polietilen dan dilapisi lempeng cadmium (Cd), maka neutron termik akan terserap oleh Cd, sehingga yang terpantau oleh alat itu hanyalah neutron cepat.

Pemantauan Kontaminasi Permukaan

Berbeda dengan pemantauan radiasi yang dimaksudkan untuk pengukuran laju dosis radiasi, kegiatan pemantauan kontaminasi dimaksudkan untuk mengukur aktivitas zat radioaktif. Jika dalam pemantauan radiasi digunakan surveymeter radiasi, maka dalam pemantauan kontaminasi ini digunakan alat untuk mengukur aktivitas zat radioaktif yang lebih sering dikenal dengan sebutan surveymeter kontaminasi. Tujuan dari pemantauan kontaminasi ini adalah :

1. Untuk memastikan bahwa tingkat kontaminasi tidak melampaui nilai batas yang telah ditetapkan.
2. Untuk menghindari terjadinya penyebaran zat radioaktif ke tempat-tempat lain.
3. Untuk mengetahui jika terjadi kebocoran pada bahan pembungkus zat radioaktif atau kegagalan prosedur operasi.
4. Untuk melengkapi informasi dalam menentukan apakah pemantauan kontaminasi udara dan pemantauan perorangan diperlukan atau tidak.

Surveymeter kontaminasi permukaan digunakan untuk pemantauan rutin pengukuran tingkat kontaminasi permukaan. Metode pengukurannya adalah dengan menyapu permukaan menggunakan detektor yang berada/ditempatkan dekat dengan permukaan yang akan diukur. Alat ini dapat dipakai untuk pengukuran langsung aktivitas total maupun aktivitas per satuan luas permukaan. Surveymeter kontaminasi permukaan merupakan alat portabel yang menggunakan pemantau Geiger-Muller, proporsional maupun sintilasi.

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

Mengingat surveymeter kontaminasi permukaan ini lebih sering dipakai untuk pemantauan kontaminasi di tempat kerja atau laboratorium, maka sering kali alat ini disebut juga sebagai alat pantau laboratorium. Umumnya surveymeter kontaminasi permukaan memberikan data hasil pengukuran tingkat kontaminasi dalam bentuk cacahan per satuan waktu, misal cacahan per sekon (cps) atau cacahan per menit (cpm). Sering kali alat ini juga dilengkapi dengan sistem bantu berupa alarm yang akan berbunyi jika hasil pencacahannya melampaui level tertentu.

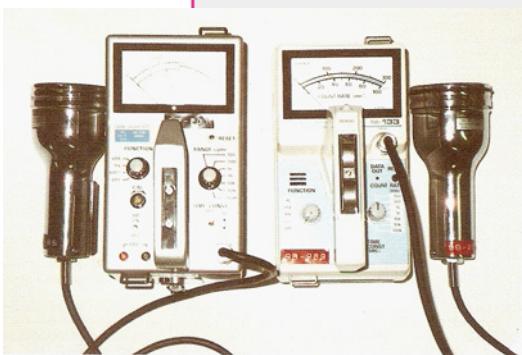
Dilihat dari jenis kontaminan yang perlu dipantau, ada jenis surveymeter kontaminasi permukaan yang hanya mampu memantau satu jenis radiasi saja, misal untuk memantau kontaminan radioaktif pemancar alpha (α) atau beta (β) saja. Namun beberapa surveymeter kontaminasi permukaan ini ada juga yang dirancang mampu memantau kedua jenis radiasi tersebut dengan teknik pengukuran tertentu. Karena kontaminasi umumnya terjadi pada permukaan yang cukup luas, misal akibat tumpahnya cairan radioaktif pada lantai, maka surveymeter kontaminasi permukaan umumnya dirancang mempunyai pemantau dengan permukaan sensitif radiasi yang cukup luas.

gambar 142.
Surveymeter
kontaminasi
untuk memantau
kontaminasi
permukaan
(sumber : JAERI)

Permukaan pemantau pada surveymeter kontaminasi biasanya dibuat lebar karena umumnya kontaminasi terjadi pada suatu permukaan yang luas. Untuk bahan pertimbangan lebih lanjut sehubungan dengan terjadinya kontaminasi pada suatu permukaan, maka data yang diperlukan untuk pengambilan keputusan adalah nilai kerapatan kontaminan (K) yang didifinisikan sebagai aktivitas kontaminan persatuan luas permukaan, biasanya dalam satuan Bq/cm^2 . Nilai K dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$K = \frac{A}{L}$$

dengan A adalah aktivitas kontaminan yang tercacah oleh surveymeter dan L adalah luas permukaan pemantau yang peka radiasi.



Pemantauan Radioaktivitas Lingkungan

Ada beberapa kegiatan instalasi nuklir yang dapat melepaskan zat-zat

Bab 9 Proteksi Radiasi Pada Manusia Dan Lingkungan

radioaktif ke lingkungan, baik pelepasan melalui cerobong untuk *efluen* gas maupun melalui saluran pembuangan untuk limbah cair. Pada umumnya pelepasan tersebut telah diperhitungkan sebelumnya dan merupakan bagian dari hasil proses optimisasi proteksi pada suatu instalasi nuklir. Pelepasan zat radioaktif ke lingkungan dapat secara langsung maupun tidak langsung memberikan paparan radiasi terhadap anggota masyarakat. Pemantauan radioaktivitas lingkungan dimaksudkan untuk menjamin bahwa pelepasan zat radioaktif ke daerah sekitar instalasi nuklir tidak akan memberikan paparan radiasi yang membahayakan pada anggota masyarakat.

Alat Cacah Radiasi

Pemantauan radioaktivitas lingkungan dilakukan melalui pengambilan sampel-sampel lingkungan seperti tanah, rumput, hasil bumi, air tanah, udara dan sebagainya. Sampel-sampel tersebut selanjutnya diproses di laboratorium untuk kemudian diukur tingkat kandungan zat radioaktifnya. Sampel-sampel yang diambil dari lingkungan dicacah dan dievaluasi sehingga dapat diperoleh informasi tentang ada atau tidaknya kandungan zat radioaktif dalam sampel tersebut. Jika ditemukan adanya zat radioaktif di dalam sampel, maka dapat dirunut dari mana asal polutan radioaktif tersebut.

Kegiatan pemantauan radioaktivitas lingkungan melibatkan penggunaan berbagai jenis instrumentasi radiasi bergantung pada tujuan akhir pemantauan itu. Adakalanya pemantauan itu bertujuan untuk mengetahui aktivitas total zat radioaktif pemanca α atau β , sehingga dalam kegiatan ini diperlukan pencacah *gross- α* atau *gross- β* . Untuk pengukuran radionuklida pemanca α atau β , karena aktivitasnya pada umumnya sangat rendah, maka dalam kegiatan ini diperlukan peralatan yang mampu mencacah radiasi dari radionuklida dengan aktivitas sangat rendah pula. Instrumentasi nuklir yang umum dipakai dalam kegiatan ini adalah pencacah berlatar rendah (*low background counter*, LBC).

Adakalanya pemantauan radioaktivitas lingkungan dimaksudkan untuk mengetahui kandungan zat-zat radioaktif jenis tertentu, misal kandungan tritium atau C-14 dalam air. Untuk keperluan ini biasanya digunakan pencacah pendar cair (*liquid scintillation counter*, LSC). Bahan pendar (*scintillator*) adalah material yang berpendar dalam daerah panjang gelombang tertentu

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

apabila berinteraksi dengan radiasi pengion. Kristal-kristal organik seperti *anthracene*, *stilbene* dan *therpeyl* secara luas dimanfaatkan sebagai bahan pemantau elektron. Untuk bahan pendar cair, larutan pendar merupakan penyerap utama energi radiasi, biasanya dipilih bahan yang memiliki alih energi ke larutan pendar cukup efisien, dan daya serap terhadap cahaya cukup kecil. Pemendar Toluene dan p-xylene merupakan jenis bahan pendar yang memenuhi kriteria tersebut. Berbagai jenis bahan pendar cair beredar secara komersial di pasaran.

Untuk pengukuran aktivitas sampel radioaktif pemancar sinar beta, terutama untuk sinar beta berenergi rendah yang sering kali mengalami serapan diri (*self absorption*) oleh sampel bahan, dapat dilakukan dengan cara melarutkan sampel tersebut ke dalam cairan pendar seperti toluene. Sampel yang akan diukur kandungan radionuklidanya harus dilarutkan atau paling tidak didispersikan secara merata dalam cairan pemendar. Metode ini mampu meningkatkan efisiensi pencacahan yang tinggi hingga mendekati 100 %.

Spektrometri Gamma

Di antara bahan pendar anorganik, pemendar NaI yang diaktifasi dengan 0,1 – 0,2 persen thallium (Tl) merupakan jenis bahan pendar yang hingga kini digunakan secara luas untuk pemantauan sinar gamma. Kerapatan NaI yang tinggi (3,7 g/cm³) dan nomor atom (Z) yang tinggi dari iodine (I) menjadikan interaksinya dengan radiasi gamma cukup baik. Kristal NaI(Tl) dengan berbagai ukuran dan bentuk hingga ratusan cm³ tersedia di pasaran. Ukuran yang paling umum untuk pemantauan radiasi gamma adalah berbentuk silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 7,5 cm (sering kali dikatakan berukuran 7,5 cm x 7,5 cm).

Pemantauan lingkungan dapat pula ditujukan untuk mengidentifikasi jenis-jenis radionuklida pemancar gamma, sehingga diperlukan instrumentasi untuk spektrometri gamma seperti pemantau sintilasi NaI(Tl) yang dihubungkan dengan penganalisa saluran ganda (*multi channel analyzer*, MCA). Nomor salur pada MCA akan sebanding dengan energi radiasi gamma yang berinteraksi dengan pemantau. Semakin besar energi gamma, semakin besar pula nomor salur tempat munculnya spectrum gamma tersebut, demikian pula sebaliknya.

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

Pemantau sintilasi NaI(Tl) dapat dipakai untuk menentukan aktivitas radionuklida secara relatif dengan menggunakan efisiensi alat cacah. Harga efisiensi alat pada masing-masing nomor salur MCA dapat dihitung dengan cara melakukan pencacahan beberapa radionuklida yang diketahui aktivitasnya. Pencacahan beberapa radionuklida pemancar gamma yang berbeda energi radiasinya itu akan menghasilkan puncak-puncak cacahan berupa spektrum radiasi gamma yang muncul pada beberapa nomor salur yang berlainan pada layar MCA. Jika aktivitas pemancar gamma tersebut diketahui, maka dapat pula dibuat kurva kalibrasi yang menunjukkan hubungan antara efisiensi pemantau dan nomor salur pada MCA.

Selain menggunakan pemantau pendar NaI(Tl), spektrometri radiasi gamma dapat pula dilakukan menggunakan pemantau semikonduktor. Pemantau ini dibuat dari bahan germanium (Ge) yang tercangkok dengan lithium (Li) sehingga membentuk pemantau semikonduktor Ge(Li) yang tersedia di pasaran dalam berbagai ukuran dan bentuk, dengan volume hingga beberapa puluh cm^3 . Teknik pembuatan pemantau semikonduktor ini cukup komplek, karena pencangkokan Li harus dilakukan dalam kondisi yang terkontrol ketat dan memerlukan waktu berminggu-minggu bahkan berbulan-bulan bergantung pada ukuran atau volume pemantau.

Energi celah (E_g) pada germanium yang cukup rendah (0,67 eV), menyebabkan bahan ini dapat berfungsi sebagai pemantau radiasi hanya pada temperatur yang sangat rendah. Untuk keperluan pendinginan biasanya digunakan nitrogen cair, sehingga pemantau Ge(Li) beroperasi pada temperatur 77 K atau sekitar -196°C . Meski harus dioperasikan pada suhu sangat rendah, pemantau Ge(Li) banyak dimanfaatkan untuk spektrometri radiasi gamma. Karena memiliki Z yang cukup tinggi, Ge mempunyai kepekaan yang cukup baik terhadap radiasi gamma.

Pemantau Ge(Li) sepanjang waktu harus dipertahankan pada temperatur nitrogen cair. Kerusakan permanen dapat terjadi apabila pemantau itu disimpan pada temperatur ruang. Untuk menghindari kelemahan pemantau Ge(Li) ini, saat ini telah dikembangkan jenis pemantau Ge intrinsik yang dibuat dari Ge dengan tingkat kemurnian sangat tinggi, sehingga tidak memerlukan pencangkokan Li untuk mencapai tingkat kemurnian yang dikehendaki. Meski harus didinginkan dengan nitrogen cair pada saat dioperasikan, namun pemantau ini tidak rusak apabila disimpan pada temperatur ruangan, sehingga tidak perlu pendinginan pada saat tidak

Bab 7 Aplikasi Teknik Nuklir Di Bidang Pangan

dioperasikan.

Energi yang diperlukan untuk pembentukan satu pasang elektron-lubang pada pemantau semikonduktor sangat kecil, kira-kira hanya 1/10 dari energi yang diperlukan untuk pembentukan satu pasang ion pada pemantau gas, atau 1/100 dari energi yang diperlukan untuk mendapatkan satu fotoelektron dari fotokatoda pemantau NaI(Tl). Oleh sebab itu, spektrum energi radiasi gamma yang dihasilkan oleh pemantau semikonduktor Ge(Li) maupun Ge kemurnian tinggi lebih tajam dibandingkan dengan spektrum yang dihasilkan oleh pemantau pendar NaI(Tl).

Kelebihan lain yang dimiliki pemantau semikonduktor adalah linieritasnya pada daerah energi yang sangat lebar. Kombinasi dari resolusi tinggi dan linieritas ini menjadikan pemantau semikonduktor sebagai spektrometer radiasi terbaik jika dikombinasikan dengan instrumentasi elektronik yang sesuai. Hampir semua spektrometri radiasi gamma modern dilakukan dengan pemantau semikonduktor. Resolusi energi yang sangat bagus pada pemantau silikon tercangkok lithium, Si(Li), berukuran kecil menjadikan pemantau ini sangat baik untuk digunakan dalam spektrometri sinar-X.

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pemanfaatan teknologi nuklir umumnya menghasilkan limbah yang banyak dikenal sebagai limbah radioaktif. Limbah radioaktif adalah zat radioaktif yang tidak terpakai dan bahan bekas serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena operasi nuklir dan tidak dapat digunakan lagi.

10.1 Sumber dan Klasifikasi Limbah Radioaktif

Sumber limbah radioaktif berasal dari :

1. Alam

Sumber radioaktif ini memang sudah ada di alam seperti: pada tambang Uranium, pasir thorium, bahan-bahan yang mengandung K-40. Lingkungan kita sendiri sebenarnya telah mendapat radioaktif alam seperti dari tanah, sinar cosmic (75 – 100 mrem/th) sebagai akibat dari peluruhan Uranium dan Thorium.

2. Industri-industri yang memanfaatkan nuklir.

Material (bahan struktur) yang terkena radiasi sehingga menjadi materi aktif atau materi yang berasal dari laboratorium riset yang menggunakan radioaktif.

3. Bahan bakar bekas dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

Klasifikasi limbah

Berdasarkan bentuk fisiknya limbah radioaktif dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu Gas, Cair dan Padat, sedangkan berdasarkan aktivitas, limbah radioaktif dikelompokkan menjadi limbah aktivitas rendah, sedang dan tinggi.



Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

tabel 14.
Kategori Limbah
Radioaktif

Berdasarkan rekomendasi Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA, *International Atomic Energy Agency*) dan kemampuan fasilitas pengelolaan limbah yang dimiliki BATAN, maka limbah radioaktif yang dikelola BATAN dapat dikategorikan seperti terlihat pada TABEL di bawah ini :

| No. | Jenis Limbah | Aktivitas (A Ci) |
|-----|---|--|
| I | Limbah Cair Aktivitas Rendah dan Sedang Pemancar Beta dan Gamma | $10^{-6} \leq A \leq 10^{-1}$ |
| II | Limbah Semi Cair (Resin) Aktivitas Rendah dan Sedang Pemancar Beta dan Gamma | $A \leq 10^{-2}$ |
| III | Limbah Padat Aktivitas Rendah dan Sedang Pemancar Beta dan Gamma : <ul style="list-style-type: none">• Terbakar• Terkompaksi• Tak Terbakar & Tak Terkompaksi | $A \leq 10^{-2}$ |
| IV | Limbah Aktivitas Rendah Pemancar Alpha | - |
| V | Limbah Aktivitas > 6 Ci | $A > 6$ |
| VI | Sumber Bekas <ul style="list-style-type: none">• Penangkal Petir• Sumber Bekas Ra-226• Sumber Bekas $1 \text{ Ci} \leq A \leq 6 \text{ Ci}$ selain Ra-226 (Co-60, Am-241, Cs-137, Kr-85, Pm-147, Sr-90, Mo-99, dll.)• Sumber Bekas $0,1 \text{ Ci} \leq A < 1 \text{ Ci}$ selain Ra-226 (Co-60, Am-241, Cs-137, Kr-85, Pm-147, Sr-90, Mo-99, dll.)• Sumber Bekas $A < 0,1 \text{ Ci}$ selain Ra-226 (Co-60, Am-241, Cs-137, Kr-85, Pm-147, Sr-90, Mo-99, dll.) | $1 \leq A \leq 6$ $0,1 \leq A < 1$ $A < 0,1$ |

10.2 Pengelolaan Limbah

Pengelolaan limbah radioaktif bertujuan untuk meminimalkan dosis radiasi yang diterima masyarakat umum $< 10^{-1}$ dosis radiasi maksimum yang diperkenankan bagi pekerja di daerah radiasi. Batasan dosis radiasi dari ICRP (*International Commission for Radiation Protection*) adalah semua penduduk tidak akan menerima dosis rata-rata 1 rem per orang dalam 30 tahun.

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pada dasarnya kegiatan pengelolaan limbah radioaktif meliputi tahapan :

1. Pengangkutan Limbah
2. Pra olah (*Pre treatment*)
3. Pengolahan
4. Penyimpanan sementara
5. Penyimpanan Lestari

Pengangkutan limbah

Pengangkutan limbah meliputi kegiatan pemindahan limbah radioaktif dari lokasi piha penghasil limbah menuju ke lokasi pengelolaan limbah. Kegiatan pengangkutan harus memenuhi syarat-syarat keamanan dan keselamatan sesuai peraturan perundungan yang berlaku. Perijinan Pengangkutan Limbah didapat dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten).

Sarana dan prasarana yang dipakai pada kegiatan pengangkutan limbah antara lain :

1. Alat angkut: truck, fork lift, crane, hand crane dan sebagainya
2. Transfer Cask / Kanister
3. Pallet.
4. Alat monitoring
5. Tanda bahaya radiasi dan tanda bahaya lainnya
6. Sarana keselamatan kerja dan sarana lain yang diperlukan

Pra olah (*Pre treatment*)

Pra olah adalah kegiatan yang dilakukan sebelum pengolahan agar limbah memenuhi syarat untuk dikelola pada kegiatan pengelolaan berikutnya. Kegiatan ini antara lain meliputi :

1. Pengelompokan sesuai dengan jenis dan sifatnya.
2. Preparasi dan analisis terhadap sifat kimia, fisika dan kimia fisika serta kandungan radiokimia
3. Menyiapkan wadah drum, plastik, lembar identifikasi dan sarana lain

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

- yang diperlukan
4. Pewadahan dalam drum 60, 100, 200 liter atau tempat yang sesuai
 5. Pengemasan untuk memudahkan pengangkutan dan pengolahan
 6. Pengukuran dosis paparan radiasi
 7. Pemberian label identifikasi dan pengisian lembar formulir isian
 8. Pengeluaran dari hotcell
 9. Penempatan dalam kanister, sehingga memenuhi kriteria keselamatan pengangkutan

Pengolahan

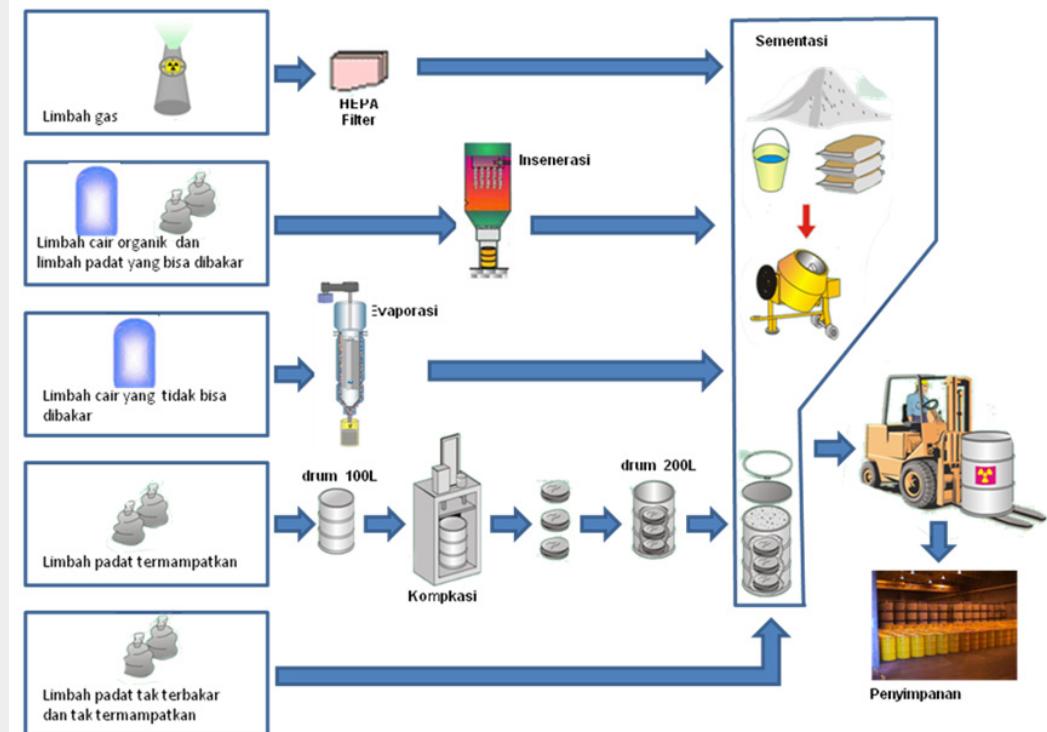
Pengolahan limbah radioaktif dilakukan berdasarkan sifat dan jenis limbah: Limbah cair organik dan limbah padat yang bisa dibakar direduksi volumenya dengan cara insenerasi.

1. Limbah cair yang tidak bisa dibakar diolah dengan cara evaporasi untuk mereduksi volumenya. Konsentrat hasil evaporasi dikungkung dalam shell beton dengan campuran semen. Bila limbah cair bersifat korosif maka limbah diolah secara kimia (*chemical treatment*) sebelum disementasi.
2. Limbah padat termampatkan, proses reduksi volumenya dilakukan dengan cara kompaksi. Limbah padat dimasukkan dalam drum 100L untuk dikompaksi, selanjutnya dimasukkan dalam drum 200L. Setelah pengisian batu korral, hasil kompaksi selanjutnya disementasi dalam drum 200L.
3. Limbah padat tak terbakar dan tak termampatkan pengolahannya dimasukkan secara langsung dengan cara sementasi dalam shell beton 350L/950L. Proses imobilisasi atau proses kondisioning dilakukan dengan menggunakan shell beton 350 liter, 950 liter, drum beton 200 liter dan drum 200 liter dengan bahan matriks campuran semen basah.
4. Limbah gas, dilakukan penyaringan menggunakan filter, sebelum dibuang ke udara, selanjutkan filter disementasi

Untuk menunjang kegiatan proses pengolahan ini diperlukan suatu koordinasi kerja yang terpadu diantara tenaga yang terdiri dari proses, penunjang sarana, keselamatan, laboratorium dan administrasi

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF



Penyimpanan sementara

Penyimpanan sementara (*Interim Storage*) dilakukan sebelum dan sesudah limbah diolah dan merupakannya transit sebelum dikirim ke penyimpanan lestari. Tujuannya adalah memungkinkan peluruhan berlangsung.

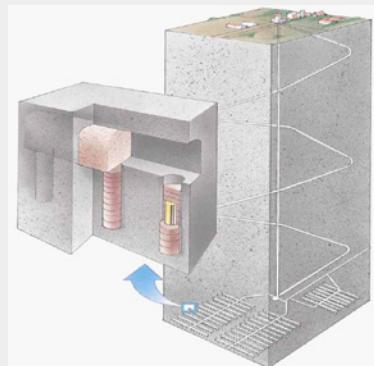
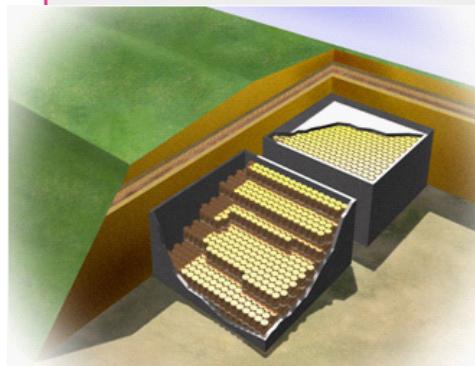
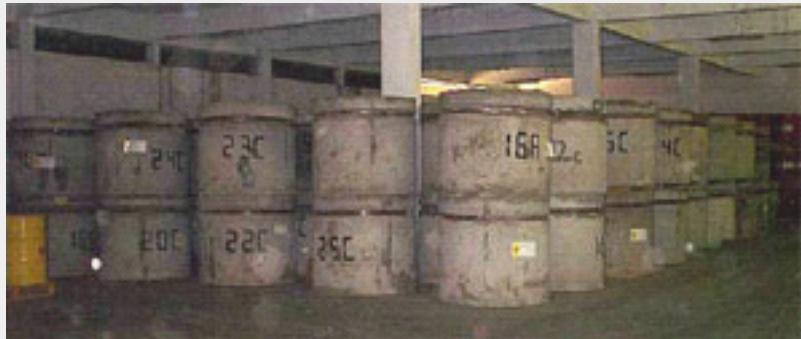
Penyimpanan Lestari

Penyimpanan lestari dari limbah secara aman adalah tujuan akhir dari

gambar 143.
Pengelolaan
Limbah
Radioaktif

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

gambar 144.
Penyimpanan
sementara (atas),
Penyimpanan
tanah dangkal
(kiri bawah),
Penyimpanan
tanah dalam
(kanan bawah)



pengelolaan limbah radioaktif dan banyak pihak di dunia belum dapat menemukan pembuangan lestari yang dapat diterima oleh semua pihak.

Penyimpanan lestari dapat mengambil lokasi di samudra, sungai, danau, daratan atau dalam bumi. Pembuangan di dalam perut bumi merupakan cara yang termurah, sekaligus memberi perisai yang aman.

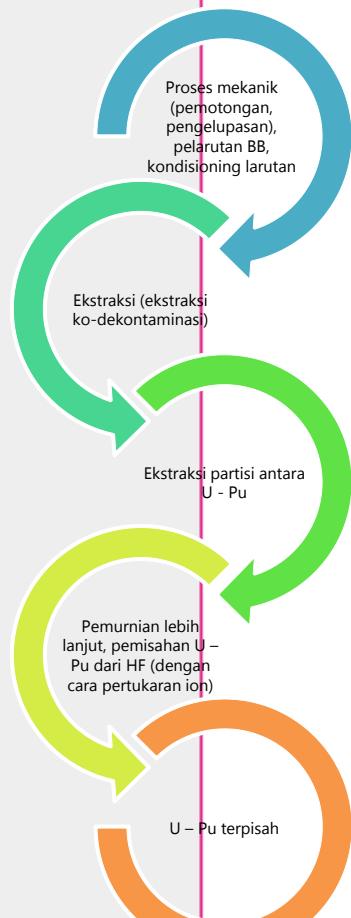
10.3 Proses Olah Ulang

Bab 10 Pengelolaan Limbah Radioaktif

Dalam bidang pengolahan limbah radioaktif juga banyak dikenal yang namanya proses olah ulang terutama pada limbah radioaktif yang berasal dari sebuah pembangkit tenaga nuklir (PLTN). Proses olah ulang ini dilakukan karena biasanya limbah radioaktif yang dihasilkan masih memiliki konsentrasi yang cukup besar sehingga masih sangat mungkin digunakan sebagai bahan bakar. prinsip dasar proses olah ulang ini secara kimia tidak berbeda dengan pemisahan di bidang industri lainnya, keistimewaan yang perlu diperhatikan antara lain adalah masalah:

1. Radioaktivitas bahan bakar nuklir, radioaktivitasnya mencapai ribuan curie, sehingga dalam proses diperlukan perisai yang cukup tebal.
2. Kritikalitas, hal ini dikarenakan bahan bakar masih memiliki reaktivitas sisa, ingat Pu-239 dapat kritis dengan massa ± 220 gram.
3. Membesarnya volum.
4. Bahaya kesehatan, Pu sangat toxic dan amat radioaktif serta memiliki waktu paruh yang cukup lama yaitu 24.300 tahun.
5. Transportasi bahan bakar bekas yang akan diproses olah ulang, oleh karena itu tempat pengolahan sebaiknya dekat dengan reaktor.
6. Pembuangan limbah, hal ini dikarenakan aktivitas limbah cukup tinggi, sehingga bias membahayakan makhluk hidup dan lingkungan disekitar tempat pembuangan limbah.

Dalam proses olah ulang ini untuk sekarang ini yang paling banyak digunakan adalah proses PUREX (Pu – U Recovery Extraction). Satu catatan penting yang harus diperhatikan limbah yang dihasilkan dari proses olah ulang ini memiliki tingkat aktivitas yang cukup tinggi.



gambar 145.
Tahapan-tahapan proses PUREX

Daftar Pustaka

1. HILMY, N., Manfaat Radiasi dalam Industri, Lingkungan, dan Kesehatan Masyarakat, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN, Yogyakarta, 25-27 April 1995, Hal. xvi-xxi.
2. THOMPSON, C., Irradiation in Industry, Nuclear Spectrum, Vol 4(2), ANSTO, Australia (1988) pp. 16-18.
3. UTAMA, M., Prospek Teknologi Polimerisasi Radiasi untuk Industri Karet Alam, Kayu dan Tekstil, Pidato Pengukuhan Ahli Peneliti Utama Bidang Kimia, PAIR-BATAN, Jakarta, 11 Desember 1998.
4. SUDARMADJI, Teknologi Nuklir, Persepsi Masyarakat dan Dampaknya Terhadap Lingkungan, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN, Yogyakarta, 26-27 Mei 1998, Hal. ix-xii.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Highlights of Activities, IAEA, Vienna, Austria (1996)
6. RAZZAK, M.T. dan SUBKHI, M.I.R., Aplikasi dan Perkembangan Teknologi Akselerator untuk Industri, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN, Yogyakarta, 8-10 Juli 1997, Hal. xiv-xvii.
7. JAMARAN, I. Dan WANGSADIPURA, A.H.S., Masa Depan Aplikasi Isotop dan Radiasi di Bidang Pertanian, Industri dan Lingkungan, Risalah Pertemuan Aplikasi Isotop dan Radiasi, PAIR-BATAN, Jakarta, 14-15 Desember 1993, Hal. 1-6.
8. WANGSAATMADJA, A.H.R., Peran Iptek Nuklir di Bidang Farmasi Sebagai Unsur Pendukung Pemenuhan Kebutuhan Dasar Manusia, Pidato Pengukuhan Ahli Peneliti Utama bidang Farmasi, PPR-BATAN, Serpong, 30 Desember 1997.
9. DJALOES, A., Pengembangan Teknologi Akselerator dan Pemanfaatannya di Indonesia, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN, Yogyakarta, 23-25 April 1996, Hal. viii-xiii.
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Annual Report 1999, IAEA, Austria, Vienna (2000).
11. NATSIR, M., Teknologi dan Aplikasi Pemercepat Elektron, Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi, PAIR-BATAN, Jakarta, 18-19 Februari 1998, Hal. 37-45.

12. RAZZAK, M.T., Modifikasi Polimer untuk Kedokteran dan Industri dengan Teknik Radiasi, Pidato Pengukuhan Ahli Peneliti Utama Bidang Kimia, PAIR-BATAN, Jakarta, 11 Desember 1997.
13. DJALOEIS, A., Peran Sains dan Teknologi Nuklir dalam Menunjang Pertumbuhan Industri dan Pengelolaan Lingkungan, Risalah Pertemuan Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, PAIR-BATAN, Jakarta, 9-10 Januari 1996, Hal. 1-7.
14. ANONIM, Research Reactor, Current Status and their Major Role, Tokai Research Establishment, JAERI, Japan.
15. YOUNG, H.D. and FREEDMAN, R.A., University Physics, (9th edition), Addison-Wesley Publishing Company, New York (1998).
16. TAYLOR, J.R. and ZAFIRATOS, C.D., Modern Physics for Scientist and Engineers, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey 07632 (1991).

