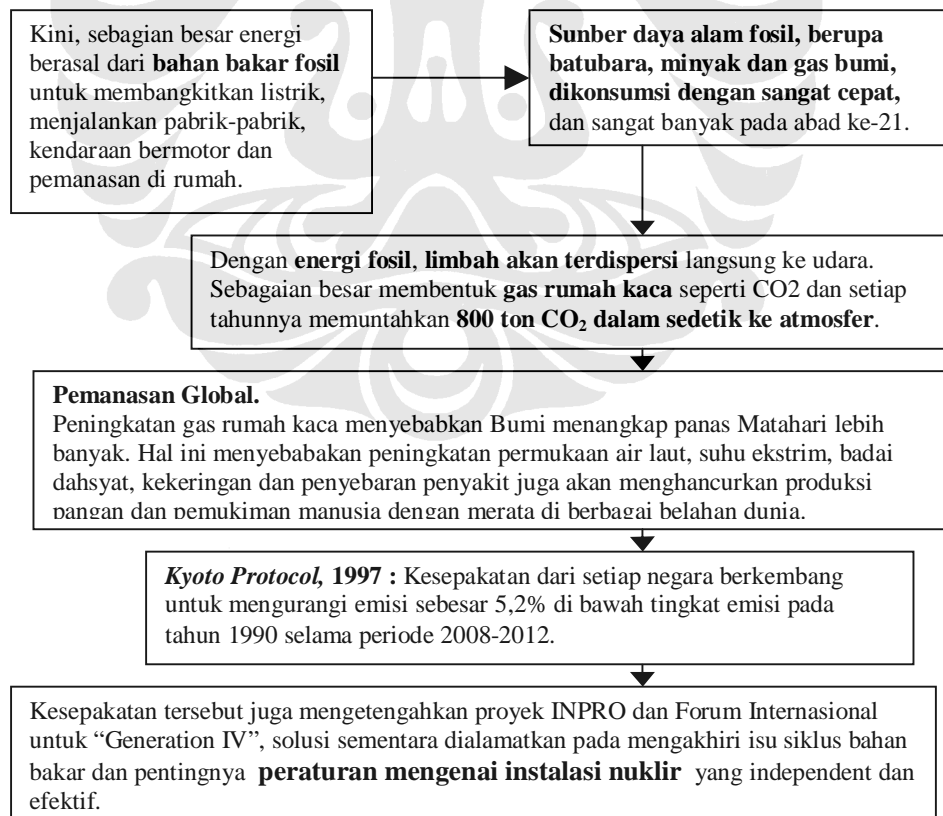


## BAB II

### STUDI LITERATUR

#### 2.1. SEJARAH SINGKAT ENERGI NUKLIR SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK

Kebutuhan akan sumber energi alternatif yang terbarukan untuk mensupport kebutuhan listrik pada kehidupan manusia sudah tidak dapat dielakkan lagi mengingat dampak penggunaan sumber energi fosil yang pada abad ke-21 ini menghadapi kenyataan semakin meningkatnya kebutuhan listrik dunia, semakin menipisnya bahan baku sumber energi, tingginya biaya produksi dan adanya dampak pemanasan global akibat penggunaannya (Gambar 2.1).



**Gambar 2.1** : Bahan Bakar Fosil dan *Global Warming* [1]

Hal ini telah diantisipasi oleh negara-negara maju di dunia yang terlihat dari jumlah penggunaan energi nuklir sebagai alternatif sumber energi terbarukan untuk pembangkit tenaga listrik negaranya, dengan kronologis perkembangannya hingga saat ini adalah :

- Energi nuklir yang dikenal sejak 1940 sebagai senjata perang atau bom dan baru sejak 1950 dimanfaatkan untuk tujuan damai yaitu dengan beroperasinya stasiun tenaga nuklir sebagai sumber energi pembangkit listrik.
- Sekarang terdapat sekitar 439 reaktor tenaga nuklir komersial yang beroperasi di 30 negara dengan total kapasitas 370.00 MWe. Sekitar 35 reaktor pembangkit sekarang sedang dalam tahap konstruksi di 11 negara (Tabel 2.1), khususnya China, Korea Selatan, Jepang dan Rusia.

**Tabel 2.1 : Data Reaktor Nuklir Dunia dan Kebutuhan Uranium. [2]**

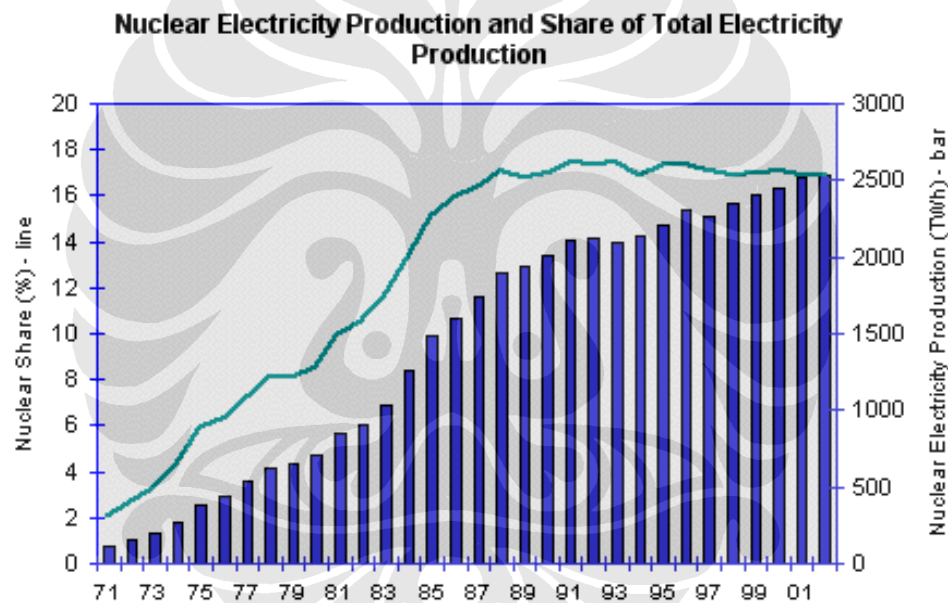
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2006		REACTORS OPERABLE March 2008		REACTORS UNDER CONSTRUCTION March 2008		REACTORS PLANNED March 2008		REACTORS PROPOSED March 2008		URANIUM REQUIRED 2008
	billion kWh	%	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
Argentina	7.2	6.9	2	935	1	692	1	740	1	740	123
Armenia	2.4	42	1	376	0	0	0	0	1	1000	51
Bangladesh	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Belarus	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0	0
Belgium	44.3	54	7	5728	0	0	0	0	0	0	1011
Brazil	13.0	3.3	2	1901	0	0	1	1245	4	4000	303
Bulgaria	18.1	44	2	1906	0	0	2	1900	0	0	261
Canada*	92.4	16	18	12652	2	1500	3	3500	5	5100	1665
China	51.8	1.9	11	8587	6	5540	29	31000	86	68000	1396
Czech Republic	24.5	31	6	3472	0	0	0	0	2	1900	619
Egypt	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1000	0
Finland	22.0	28	4	2696	1	1600	0	0	1	1000	1051
France	428.7	78	59	63473	1	1630	0	0	1	1600	10527
Germany	158.7	32	17	20339	0	0	0	0	0	0	3332
Hungary	12.5	38	4	1826	0	0	0	0	2	2000	271
India	15.6	2.6	17	3779	6	2976	10	8560	9	4800	978
Indonesia	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0	0
Iran	0	0	0	0	1	915	2	1900	1	300	143

	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2006		REACTORS OPERABLE March 2008		REACTORS UNDER CONSTRUCTION March 2008		REACTORS PLANNED March 2008		REACTORS PROPOSED March 2008		URANIUM REQUIRED 2008
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Japan	291.5	30	55	47577	2	2285	11	14945	1	1100	7569
Kazakhstan	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300	0
Korea DPR (North)	0	0	0	0	0	0	1	950	0	0	0
Korea RO (South)	141.2	39	20	17533	3	3000	5	6600	0	0	3109
Lithuania	8.0	69	1	1185	0	0	0	0	2	3200	225
Mexico	10.4	4.9	2	1310	0	0	0	0	2	2000	246
Netherlands	3.3	3.5	1	485	0	0	0	0	0	0	98
Pakistan	2.6	2.7	2	400	1	300	2	600	2	2000	65
Romania	5.2	9.0	2	1310	0	0	2	1310	1	655	174
Russia	144.3	16	31	21743	7	4920	8	9600	20	18200	3365
Slovakia	16.6	57	5	2064	2	840	0	0	0	0	313
Slovenia	5.3	40	1	696	0	0	0	0	1	1000	141
South Africa	10.1	4.4	2	1842	0	0	1	165	24	4000	303
Spain	57.4	20	8	7442	0	0	0	0	0	0	1398
Sweden	65.1	48	10	9016	0	0	0	0	0	0	1418
Switzerland	26.4	37	5	3220	0	0	0	0	3	4000	537
Thailand	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4000	0
Turkey	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4500	0
Ukraine	84.8	48	15	13168	0	0	2	1900	20	27000	1974
United Kingdom	69.2	18	19	11035	0	0	0	0	0	0	2199
USA	787.2	19	104	99049	0	0	7	10180	25	32000	18918
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
<b>WORLD**</b>	<b>2658</b>	<b>16</b>	<b>439</b>	<b>371,989</b>	<b>35</b>	<b>28,798</b>	<b>91</b>	<b>99,095</b>	<b>228</b>	<b>198,995</b>	<b>64,615</b>
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2006		REACTORS OPERATING		REACTORS BUILDING		ON ORDER or PLANNED		PROPOSED		URANIUM REQUIRED

Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency* /IAEA) meningkatkan proyeksi kapasitas pembangkit tenaga nuklir secara signifikan. Saat ini diantisipasi sekurangnya 60 reaktor baru dalam 15 tahun ke depan, menghasilkan 430 GWe pada 2020 yaitu 130 GWe lebih tinggi dari yang diproyeksi dalam tahun 2000 dan 16% lebih tinggi dari

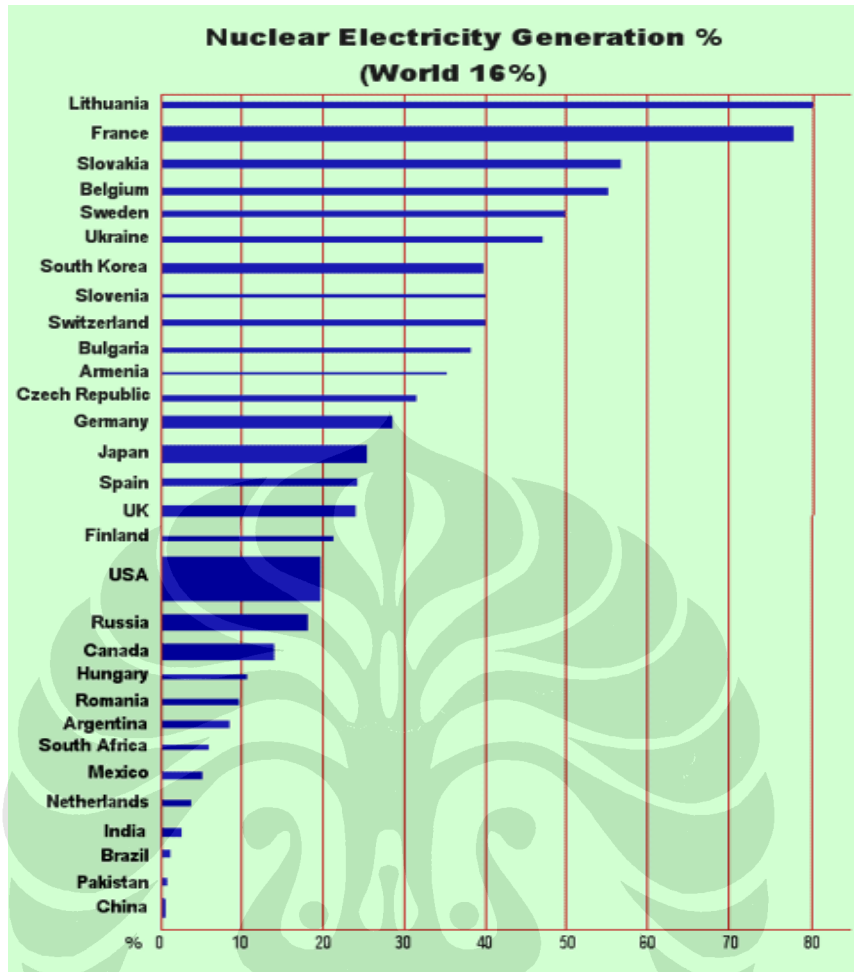
yang telah beroperasi di tahun 2006. Perubahan tersebut terjadi berdasarkan perencanaan khusus pada beberapa negara, termasuk China, India, Rusia, Finlandia dan Perancis, dan dipercepat lagi dengan adanya perubahan pandangan yang disebabkan *Kyoto Protocol* untuk mengatasi *Global Warming*. Hal ini akan memberikan 17% peran tenaga nuklir dalam produksi listrik pada tahun 2020. Pertumbuhan tercepat adalah di Asia.

- Reaktor komersial tersebut men-supply 16% dari listrik dunia, sebagai *base-load power*, dengan nilai efisiensi yang meningkat. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 :** Produksi Listrik Tenaga Nuklir dan Proporsinya Terhadap Total Produksi Listrik. [1]

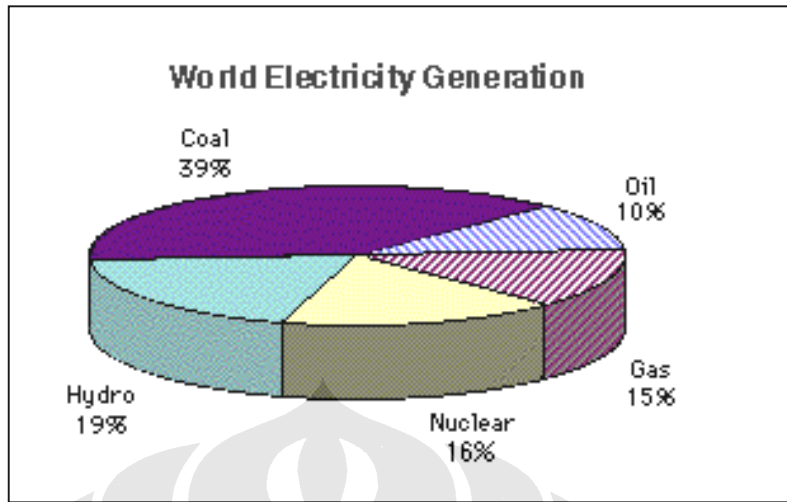
Negara yang dominan memanfaatkan nuklir untuk memenuhi kebutuhan listrik di negaranya adalah Lithuania dan Perancis yaitu 80% dan 78%. (Gambar 2.3). Sedangkan Korea Selatan, Jepang serta Amerika masing-masing memanfaatkan nuklir untuk 40%, 25% dan 20% dari produksi totalnya.. India dan Cina terlihat mulai menggunakan nuklir untuk pembangkit listriknya walau masih dibawah 5%.



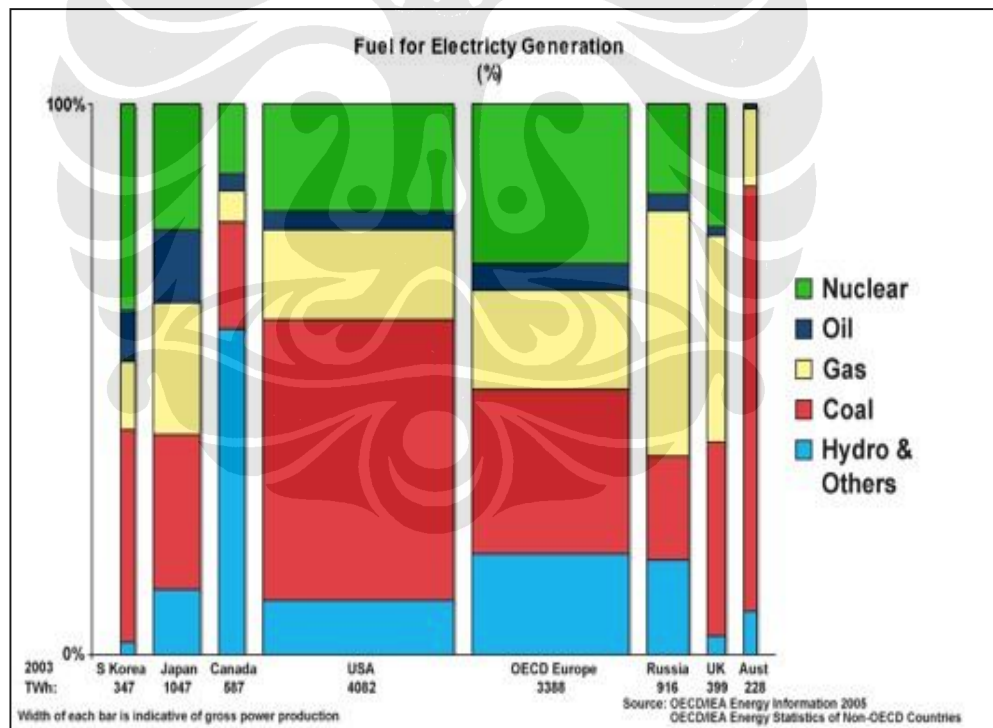
**Gambar 2.3 :** % Produksi Listrik Nuklir di Berbagai Negara. [1]

Sumber energi lain yang masih dominant digunakan untuk pembangkit listrik saat ini adalah batu bara, minyak bumi dan gas bumi yang merupakan energi fosil dan akan menurun cadangan depositnya dalam 50 tahun kedepan, disamping dampak pemanasan global yang juga dihasilkan dari gas buangnya.

Perbandingan bahan baku sumber energi untuk pembangkit listrik dan negara-negara penggunaanya ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan 2.5 dibawah. Terlihat bahwa sumber energi terbesar saat ini adalah batu bara (39%), dan yang terkecil adalah minyak bumi (10%) dengan tenaga nuklir pada urutan ke tiga yaitu 16%.



**Gambar 2.4** : Perbandingan Bahan Sumber Energi Pembangkit Listrik. [1]



**Gambar 2.5** : Negara dan Sumber Energi Pembangkit Listrik. [1]

- Saat ini hanya 8 negara dengan kemampuan persenjataan nuklir, dan sebaliknya 56 negara mengoperasikan total 284 reaktor penelitian

(*research reactors*) untuk memenuhi kebutuhan neutron dalam penelitian ilmiah dan produksi isotop untuk kedokteran dan industri, disamping 220 kapal dan kapal selam tenaga nuklir (*reactors power ships and submarines*). Lebih dari 150 kapal digerakkan lebih dari 220 reaktor nuklir dengan pengalaman diatas 12000 tahun-reaktor yang diperoleh dengan *marine* reaktor.

Dari uraian diatas diperoleh bahwa penggunaan energi nuklir di dunia terus meningkat dan hal ini tidak lepas dari analisis para pakar mengenai manfaat dan proteksi terhadap bahaya yang ditimbulkan.

## **2.2. SUMBER DAN MANFAAT REAKSI NUKLIR SEBAGAI SUMBER ENERGI DAN RADIASI BUATAN**

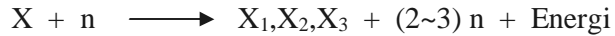
Sumber radiasi buatan adalah sumber radiasi nuklir yang sengaja dibuat manusia untuk dimanfaatkan sepenuhnya bagi kesejahteraan umat manusia. Oleh karena sumber radiasi buatan ini dengan sengaja dibuat manusia, maka ia bisa disesuaikan dengan keinginan manusia. Begitu juga dengan intensitasnya, dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Pada dasarnya, sumber radiasi buatan dapat dibagi menjadi lima bagian yang akan dijelaskan kemudian, yaitu reaktor nuklir, akselerator, irradiator, pesawat rontgen dan radioisotop.

### **2.2.1. Reaktor Nuklir**

Reaktor nuklir, atau yang juga dikenal dengan reaktor atom, adalah tempat terjadinya reaksi inti yang menghasilkan radiasi buatan berupa zat radioaktif. Secara garis besar dan cara kerjanya, reaksi nuklir dibedakan menjadi dua, yaitu Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi.

#### *2.2.1.1. Reaksi Fisi*

Reaksi Fisi dilakukan di dalam suatu reaktor atom dengan cara menembaki sasaran, yaitu atom atau unsur yang dapat membelah (fisi) menjadi atom yang lebih kecil (hasil belah) yang bersifat radioaktif dengan neutron. Secara umum, reaksi fisi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut:



Keterangan :

X = Inti sasaran, atom atau unsur yang dapat membelah sehingga sering disebut bahan belah (bahan fisil), atau yang sangat dikenal dalam reaktor daya dengan sebutan bahan akar, karena dari hasil reaksi inti tersebut akan selalu dihasilkan energi (E).

n = neutron penembak yang semula hanya ada satu, tetapi setelah reaksi inti menjadi dua atau tiga neutron baru.

$X_1, X_2, X_3$  = radionuklida (unsur radioaktif) baru yang merupakan hasil pembelahan.

$(2\sim 3)n$  = neutron baru

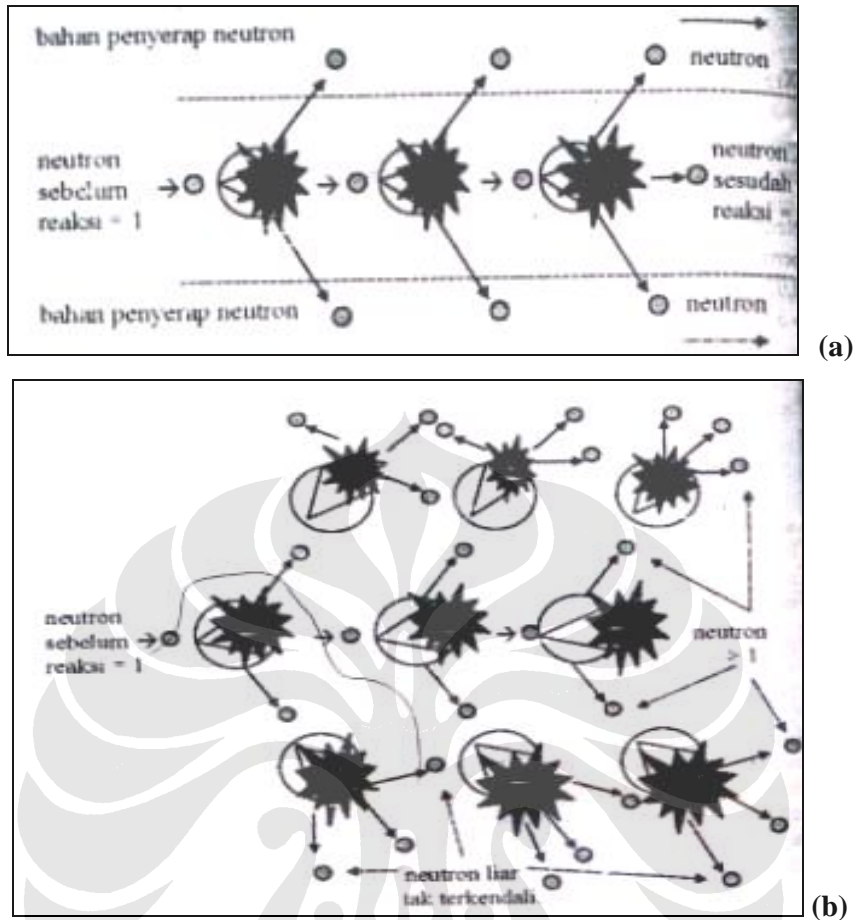
Energi = energi hasil reaksi fisi.

Neutron yang digunakan untuk menembak sasaran agar terjadi reaksi pembelahan adalah neutron yang memiliki energi termal, yaitu sekitar 0,025 eV. Sedangkan neutron hasil pembelahan yang jumlahnya antara dua hingga tiga buah neutron, akan mempunyai energi yang tinggi, yaitu sekitar 2 MeV.

Berdasarkan jumlah neutron yang dihasilkan pada reaksi fisi, dikenal dua jenis reaksi fisi, yaitu:

- Reaksi Fisi Terkendali, yaitu reaksi fisi yang jumlah neutron hasil reaksinya terkendalikan, sehingga tetap sama dengan satu seperti keadaan neutron semula. Hal ini dapat dicapai dengan menyerap kelebihan neutron. Reaksi ini adalah yang pada umumnya terjadi di dalam reaktor nuklir (Gambar 2.6 (a)).
- Reaksi Fisi Tak Terkendali, yaitu reaksi fisi yang jumlah neutron setelah pembelahan tidak terkendalikan, sehingga neutron hasil pembelahan masih dimungkinkan akan menembak sasaran lain yang akan menghasilkan lebih banyak lagi radionuklida baru seperti halnya yang terjadi pada ledakan bom atom. Akibat reaksi ini adalah terjadinya reaksi berantai (Gambar 2.6 (b)).





**Gambar 2.6 :** Reaksi fisi (a)terkendali dan (b)tak terkendali. [3]

Radionuklida hasil reaksi fisi merupakan inti yang tidak stabil. Agar stabil, inti-inti tersebut akan meluruh dengan memancarkan radiasi. Bentuk peluruhannya dapat berupa pancaran radiasi *Alpha* ( $\alpha$ ), *Beta* ( $\beta$ ) atau *Gamma* ( $\gamma$ ). Selain itu, perlu juga diketahui beberapa bahan penting yang dapat beraksi fisi (bahan fisil). Beberapa bahan fisil tersebut terdapat di alam dan hasil reaksi fisinya menghasilkan banyak sekali radionuklida baru dan juga bahan fisil baru. Bahan-bahan yang dapat beraksi fisi tersebut adalah:

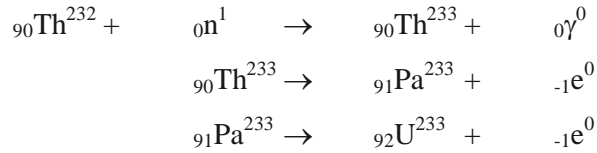
Bahan fisil alam:

- Uranium 235 ( ${}_{92}\text{U}^{235}$ )
- Uranium 238 ( ${}_{92}\text{U}^{238}$ )

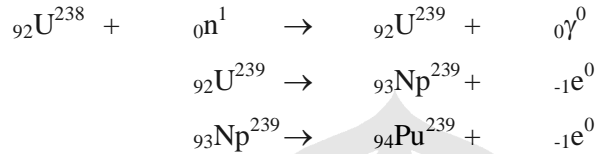
Bahan fisil buatan (bahan fisil baru):

- Uranium 233 ( ${}_{92}\text{U}^{233}$ )
- Plutonium 239 ( ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ )

Bahan fisil buatan atau bahan fisil baru  ${}_{92}\text{U}^{233}$  diperoleh dari:



Sedangkan bahan fisil baru  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$  didapat dari reaksi inti berikut ini:



Keberhasilan dalam membuat bahan fisil baru seperti contoh tersebut di atas membawa manusia pada pemikiran untuk menciptakan satu reaktor nuklir baru yang dapat membuat bahan fisil baru atau bahan bakar baru. Reaktor jenis ini disebut dengan reaktor pembiak (*breeder reactor*). Reaktor pembiak ini akan banyak berperan dalam menghasilkan energi guna mengatasi kebutuhan energi dunia yang terus meningkat, sementara cadangan sumber daya alam berupa energi primer (konvensional) sangat terbatas.

Unsur radioaktif baru yang dihasilkan dari reaksi tersebut sangat banyak. Radioisotop-radioisotop ( unsur radioaktif ) baru tersebut dapat menjadi unsur yang stabil ataupun tetap memancarkan radiasi dan peluruhannya membentuk deret yang dikenal dengan deret Neptunium( Tabel 2.2).

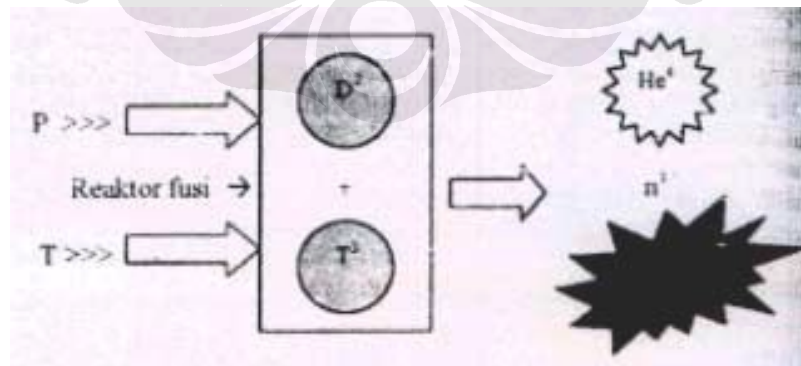
**Tabel 2.2** : tabel deret Np atau deret  $4n + 1$ . [3]

Nuklida	Radiasi	Waktu Paro ( $t_{1/2}$ )
${}_{94}\text{Pu}^{241}$	$\alpha, \beta$	13 tahun
${}_{95}\text{Am}^{241}$	$\alpha$	458 tahun
${}_{92}\text{U}^{237}$	$\beta$	6,75 hari
${}_{93}\text{Np}^{237}$	$\alpha$	$2,20 \times 10^6$ tahun
${}_{91}\text{Pa}^{233}$	$\beta$	27 hari
${}_{92}\text{U}^{233}$	$\alpha$	$1,62 \times 10^5$ tahun
${}_{90}\text{Th}^{229}$	$\alpha$	7.340 tahun

${}_{88}\text{Ra}^{225}$	$\beta$	14,8 hari
${}_{89}\text{Ac}^{225}$	$\alpha$	10 hari
${}_{87}\text{Fr}^{221}$	$\alpha$	4,8 menit
${}_{85}\text{At}^{217}$	$\alpha$	0,018 detik
${}_{83}\text{Bi}^{213}$	$\alpha, \beta$	47 menit
${}_{84}\text{Po}^{213}$	$\alpha$	$4,2 \times 10^{-6}$ detik
${}_{81}\text{Th}^{209}$	$\beta$	2,2 menit
${}_{82}\text{Pb}^{209}$	$\beta$	3,3 jam
${}_{83}\text{Bi}^{209}$	<b>Stabil</b>	-

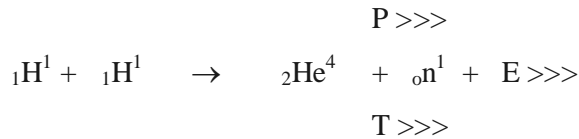
### 2.2.1.2. Reaksi Fusi

Reaksi Fusi adalah reaksi penggabungan secara paksa atom-atom kecil menjadi atom-atom yang lebih besar (Gambar 2.7). Untuk memaksa atom-atom kecil tersebut bergabung menjadi yang lebih besar, diperlukan modal awal berupa panas yang tinggi yang akan digunakan untuk memicu terjadinya reaksi fusi tersebut. Reaksi fusi akan menghasilkan energi (panas) yang sangat tinggi, jauh melebihi panas yang dihasilkan pada reaksi fisi. Oleh karena hal itu, maka salah satu energi alternatif untuk masa mendatang adalah energi dari reaksi fusi. Reaksi fusi sejauh ini masih dalam taraf pengembangan lebih lanjut untuk mendapatkan kepastian keselamatan dalam penggunaannya.

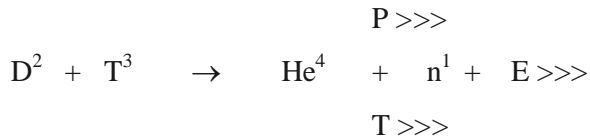


**Gambar 2.7** : Ilustrasi Reaksi Fusi. [3]

Contoh reaksi fusi adalah sebagai berikut:



Reaksi fusi tersebut sering ditulis dengan:



Keterangan:

- P >>>** = Tekanan yang sangat tinggi, sehingga wadah untuk terjadinya reaksi fusi harus kuat, agar dapat menahan tekanan yang sangat tinggi tersebut.
- T >>>** = Suhu untuk memicu reaksi fusi sangat tinggi. Ordennya bisa mencapai lebih besar dari 10.000 derajat Celcius. Suhu setinggi ini dapat dibangkitkan dengan bantuan teknologi LASER.
- E >>>** = Energi (panas) yang dihasilkan reaksi fusi sangat tinggi. Ordennya bisa mendekati jutaan derajat Celcius. Secara teoritis, reaksi fusi dapat menghasilkan panas seperti yang terjadi pada matahari.
- D<sup>2</sup> (<sub>1</sub>H<sup>2</sup>)** = Deuterium (Hidrogen Dua) untuk bahan bakar tersebut diperoleh dari destilasi air laut untuk diambil deuterium.
- T<sup>3</sup> (<sub>1</sub>H<sup>3</sup>)** = Tritium (Hidrogen Tiga) didapat dari unsur yang ada pada kulit (kerak) bumi.

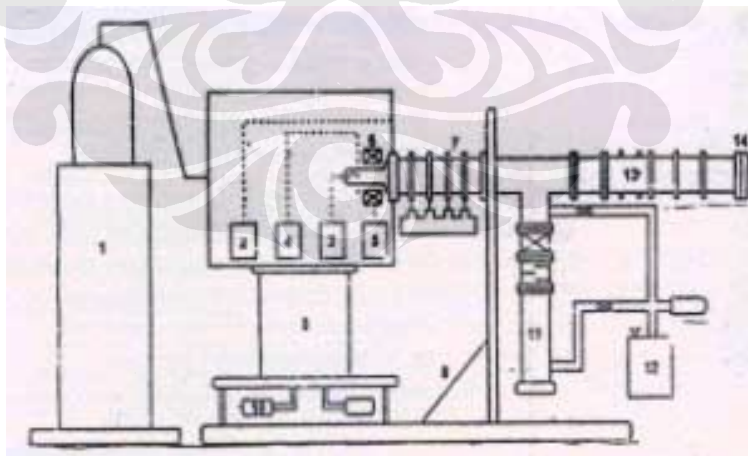
Oleh karena D<sup>2</sup> diperoleh dari laut dan T<sup>3</sup> didapat dari kulit bumi, maka selama laut belum kering dan bumi masih ada, secara teoritis penyediaan energi untuk masa datang melalui reaksi fusi tidak perlu dikhawatirkan. Persoalannya adalah, bagaimana dapat diciptakan suatu bahan sebagai wadah reaksi fusi yang dapat menahan tekanan dan suhu yang ekstra tinggi. Hal inilah yang menjadi tantangan para ilmuwan sekarang dan masa mendatang. Rintisan reaktor fusi saat ini sedang terus dikembangkan dan hasilnya antara lain adalah reaktor riset fusi nuklir di Tokamak. Reaktor fusi Tokamak pada saat ini dikerjakan bersama

melalui konsorsium negara-negara maju, seperti Amerika Serikat, Inggris, Jerman, Perancis dan Jepang.

### 2.2.2. Akselerator

Akselerator adalah alat untuk mempercepat partikel bermuatan yang pada awalnya merupakan alat untuk menghasilkan neutron (Gambar 2.8). Pada perkembangannya, akselerator juga dapat dijadikan sebagai pengganti reaktor nuklir karena dapat menghasilkan zat radioaktif. Akselerator penghasil neutron pada dasarnya ada dua macam, yaitu:

- a. Akselerator linier, yaitu pemercepat partikel yang dilengkapi dengan sumber tegangan tinggi yang berupa generator Cockroft-Walton, atau dapat juga menggunakan generator Van de Graaff. Dalam hal ini, partikel bermuatan dipercepat gerakannya secara linier, sehingga alat ini juga sering dikenal dengan *lineac* (*linear accelerator*).
- b. Akselerator siklis, yaitu akselerator yang dilengkapi dengan alat pemercepat partikel yang gerakannya melingkar mengikuti sepasang alur *Dee* yang ada di dalam medan magnet tertentu. Contoh jenis ini adalah *Dee cyclotron*.



**Gambar 2.8 :** Rangkaian Akselerator. [3]

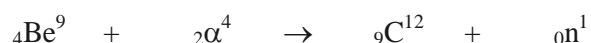
Khusus kaitannya dengan teknologi nuklir, pengertian akselerator lebih menjurus pada suatu alat yang dirancang untuk mempercepat gerakan suatu berkas elektron

atau ion dan mengendalikan karakteristiknya, yaitu intensitas dan energi kinetiknya. Secara garis besar, akselerator terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

1. Sumber berkas (*beam source*), atau yang lebih dikenal dengan nama macam sumber berkas yang dihasilkan, yakni sumber ion (*ion source*) atau sumber elektron (*electron source*) yang merupakan alat penghasil ion / elektron yang akan ditembakkan ke atom sasaran. Sumber berkas pada umumnya berada dalam fase gas.
2. Sistem pemercepat partikel (*acceleration system*), yaitu suatu alat berupa sumber tegangan tinggi yang mempercepat gerakan ion / elektron. Alat tersebut sering disebut dengan generator tegangan tinggi.
3. Sistem pengendali berkas, yaitu seperangkat alat yang mengendalikan arah, ukuran (*size*) dan bentuk berkas. sistem ini terdiri dari perangkat penghasil medan magnet, sistem *slits* dan kolimator, sistem hampa dan sistem pemantauan berkas (*beam monitoring system*).

Akselerator adalah alat pemercepat partikel bermuatan yang menghasilkan neutron sehingga akselerator sering pula dinamakan generator neutron. Neutron yang dihasilkan oleh akselerator memiliki tenaga yang bisa lebih besar dari 0,1 MeV. Akhir-akhir ini, akselerator semakin dikembangkan dengan variasi tegangan dan arus ion sesuai dengan energi neutron yang diperlukan. Pemakaian akselerator sebagai generator neutron memungkinkannya untuk menghasilkan neutron cepat dengan monoenergi atau neutron energi tunggal.

Neutron pertama kali ditemukan oleh fisikawan Jerman, W. Bothe dan H. Becker, pada tahun 1930. Mereka menemukan neutron dari hasil reaksi inti antara Berilium dengan partikel *Alpha* yang berasal dari Radium. Reaksi inti tersebut terjadi sebagai berikut:



Penulisan reaksi inti tersebut sering disingkat dengan  ${}_4\text{Be}^9 (\alpha, n) {}_9\text{C}^{12}$ .

Prinsip kerja terjadinya neutron pada akselerator seperti reaksi inti tersebut di atas. Dalam hal ini, partikel bermuatan yang dipercepat ditembakkan ke atom sasaran, sehingga terjadi reaksi inti yang menghasilkan neutron. Beberapa bahan yang digunakan sebagai target antara lain adalah  $H^2$ ,  $H^3$ ,  $Li^7$  dan  $Be^9$ . Sedangkan partikel bermuatan yang dipercepat sebagai penembak pada umumnya adalah proton ( $p^+$ ), deuterium ( $d^+$ ) dan partikel *Alpha* ( $\alpha^+$ ).

Setiap terjadi reaksi inti, pasti menghasilkan energi. Demikian juga yang terjadi pada akselerator. Ada dua kejadian yang akan sedikit dijelaskan untuk mengetahui cara terjadinya energi reaksi inti pada akselerator dan besar energi neutron yang dihasilkan, yaitu:

1. Energi hasil reaksi inti.

Yaitu reaksi inti yang terjadi akibat adanya sasaran yang ditembak oleh partikel bermuatan yang dipercepat. Reaksinya ditulis sebagai berikut:



Keterangan:

A = Sasaran diam yang mempunyai massa  $M_A$ .

X = Partikel yang dipercepat dengan massa  $M_x$  dan energi kinetik  $E_x$ .

B = Partikel radioaktif hasil reaksi dengan massa  $M_B$  dan energi kinetik  $E_B$ .

N = Neutron hasil reaksi inti dengan massa  $M_n$  dan energi  $E_n$ .

Q = Energi hasil reaksi inti.

Karena sasaran diam, ( $E_A = 0$ ), sehingga persamaan Q menjadi:

$Q = E_B + E_n - E_x$
-----------------------

.....(2.1 )

Apabila Q bernilai positif, maka reaksi bersifat eksoenergetik, yaitu reaksi yang disertai dengan timbulnya energi kinetik sebagai akibat dari pengecilan massa diam. Reaksi seperti ini tidak memerlukan persyaratan kinematik tertentu agar ia dapat berlangsung. Jadi, reaksi dapat berlangsung untuk sembarang energi kinetik partikel yang datang, asalkan energi tersebut cukup untuk menerobos penghalang inti Coulomb dari partilel-partikel bermuatan.

Apabila  $Q$  bernilai negatif, maka reaksi mengakibatkan kenaikan massa diam, karena terjadi penurunan energi kinetik. Peristiwa ini disebut dengan endoenergetik. Reaksi hanya dapat berlangsung apabila energi partikel datang  $E_x$  lebih besar daripada energi ambang. Energi ambang ditentukan secara tunggal oleh nilai  $Q$  dan  $M_x$  serta  $M_A$ . Reaksi inti ini sering ditulis dengan:



Untuk reaksi rendah (tak relativistik) yang energi partikel datang  $E_x \leq 10$  MeV, energi ambang dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_{\text{ambang}} = [Q] \frac{M_A + M_X}{M_A} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2. Energi neutron hasil reaksi inti

Neutron yang dihasilkan dari akselerator dapat berupa neutron bertenaga tunggal (monoenergetik) atau neutron bertenaga majemuk (polyenergetik), sesuai dengan pilihan reaksi yang digunakan. Energinya dapat bervariasi dengan mengubah energi partikel penembak.

Reaksi-reaksi inti yang dapat digunakan pada akselerator produksi neutron adalah seperti contoh di bawah ini:

H3 (p , n) He3	Q = - 0,743 MeV
Li7 (p , n) Be7	Q = - 1,644 MeV
H2 (d , n) He3	Q = + 3,268 MeV
H3 (d , n) He4	Q = + 17,588 MeV
Be9 ( $\alpha$ , n) C12	Q = + 5,704 MeV



Selanjutnya, neutron yang dihasilkan oleh akselerator ini diarahkan pada sasaran baru berupa atom yang akan dijadikan atom radioaktif. Inti atom yang radioaktif atau dalam keadaan tidak stabil akan memancarkan radiasi Alpha, Beta dan Gamma, atau mungkin partikel bermuatan.

Interaksi neutron dengan suatu materi yang stabil kemudian menghasilkan materi yang tidak stabil (zat radioaktif) dinamakan proses aktivasi. Teknik analisis yang menggunakan sumber neutron cepat yang berasal dari akselerator dalam proses aktivasi dikenal dengan nama Teknik Analisis Aktivasi Neutron. Cara analisis dengan aktivasi neutron pada saat ini terus berkembang, karena secara teknoekonomi berani bersaing dengan teknik aktivasi menggunakan reaktor nuklir lantaran biayanya relatif lebih murah. Ini juga yang menyebabkan akselerator dipakai sebagai pengganti reaktor nuklir.

Teknik analisis aktivasi neutron saat ini banyak sekali digunakan untuk menganalisis suatu bahan yang belum diketahui jenis unsurnya secara tepat dan cepat. Hal ini dimungkinkan karena setiap unsur yang belum diketahui bila dikenai neutron (diaktivasi) akan menjadi unsur radioaktif. Setiap unsur radioaktif mempunyai sifat dan karakteristik tertentu yang berbeda-beda, terutama yang sangat khusus, yaitu waktu paro dan energi radiasinya. Untuk mengetahui unsur radioaktif yang dimaksud tersebut, dalam teknik analisis aktivasi neutron digunakan suatu alat analisis spektrum energi radiasi yaitu *Multi Channel Analyzer* (MCA). Jika dari hasil analisis spektrum energi radiasi sudah dapat ditentukan unsur radioaktifnya, maka dengan teknik "berjalan mundur" akan diketahui unsur asli yang akan dicari. Beberapa jenis reaksi inti antara neutron yang dihasilkan dari akselerator dengan bahan target antara lain:

- Reaksi ( $n, \alpha$ )
- Reaksi ( $n, 2n$ )
- Reaksi ( $n, \gamma$ )
- Reaksi fisi ( $n, f$ )

Semua contoh reaksi tersebut dapat digunakan pada teknik analisis aktivasi neutron yang menghasilkan unsur-unsur radioaktif. Selain itu, akselerator juga

dapat digunakan sebagai "mesin implantasi ion". Mesin implantasi ion berfungsi sebagai pencangkok ion ke dalam suatu bahan dengan cara menembakkan ion ke dalam bahan tersebut dengan menggunakan mesin pemercepat partikel (akselerator).

### 2.2.3 Irradiator

Irradiator adalah suatu alat yang digunakan untuk meradiasi suatu bahan dengan sumber radiasi yang ada pada irradiator yang umumnya berupa sumber radiasi Gamma dengan aktivitas tinggi. Sumber radiasi Gamma pada umumnya memiliki aktivitas yang cukup besar dan umur paro yang panjang agar aktivitasnya relatif tetap, karena seiring berjalannya waktu, maka aktivitas akan menurun secara eksponensial. Jika umurnya panjang, maka penurunan aktivitasnya lambat, sesuai dengan persamaan de Alembert :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

.....(2.3)

Keterangan:

- A = aktivasi saat ini
- A<sub>0</sub> = aktivasi semula
- λ = konstanta peluruhan
- t = selang waktu dari awal hingga saat ini

Radiasi Gamma yang keluar dari irradiator dapat diarahkan ke suatu sasaran yang dibuat menjadi radioaktif. Radiasi Gamma yang diserap oleh bahan memungkinkan terjadinya reaksi inti melalui proses reaksi (γ , p), (γ , n), atau (γ , α). Proses reaksi inti sering disebut juga dengan *photodisintegration*. Adakalanya juga reaksi tersebut dinamakan *nuclear photoeffect*. Contoh reaksi yang menggunakan irradiator Gamma adalah sebagai berikut:



Berilium yang semula tidak aktif dapat menghasilkan radiasi Alpha (ditunjukkan dengan dua inti Helium) karena ditembak oleh radiasi Gamma. Dalam contoh

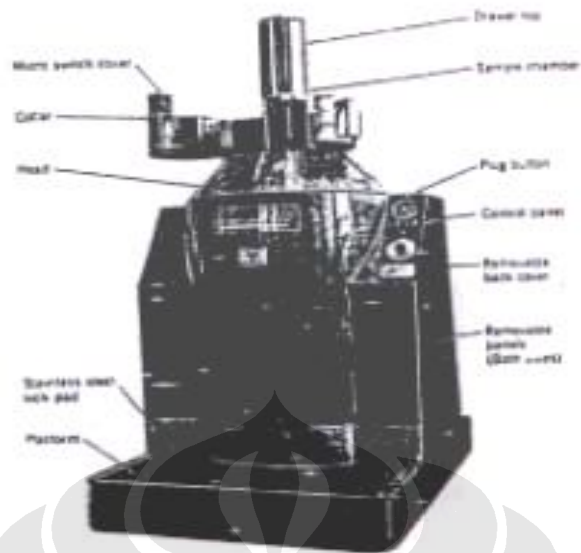
tersebut, selain menghasilkan radiasi Alpha, juga dihasilkan radiasi neutron. Tingkat kesulitan suatu bahan untuk bereaksi inti dengan radiasi Gamma bergantung pada tenaga radiasi Gamma yang digunakan dan penampang melintang bahan terhadap radiasi Gamma. Penampang lintang tersebut tidak lain adalah kementakan atau kebolehdjian suatu bahan menyerap radiasi Gamma.

Selain untuk keperluan reaksi inti, irradiator pada saat lebih banyak digunakan untuk keperluan aplikasi teknologi nuklir dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan dan industri. Pemanfaatan radiasi Gamma ini berdasarkan beberapa sifatnya yang terjadi pada saat berinteraksi dengan materi, baik melalui prose kimia, prose fisika, proses biokimia, maupun proses biologi. Proses yang terjadi tergantung pada bahan yang diradiasi, bisa terjadi sendiri-sendiri atau melalui proses penggabungan.

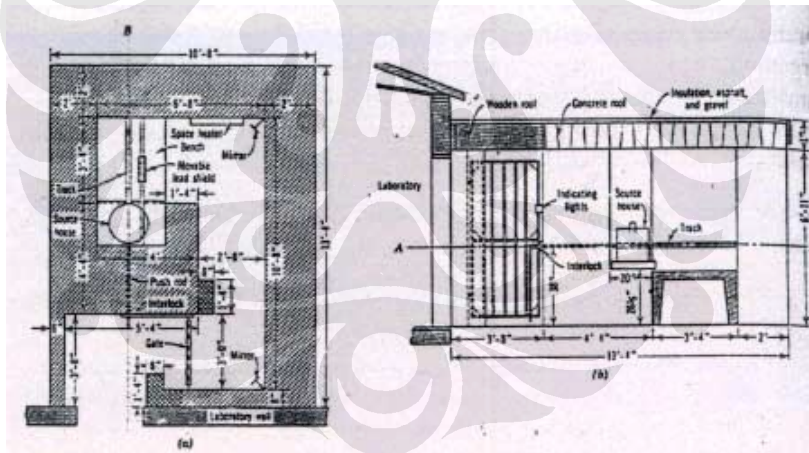
Irradiator yang banyak digunakan sebagai sumber radiasi antara lain Cobalt 60 yang memiliki umur paro 5,27 tahun dan Cesium 137 yang berumur paro 30 tahun. Pemakaian Cs 137 sebagai sumber radiasi lebih menguntungkan ketimbang penggunaan Co 60, mengingat umur paronya lebih panjang. Aktivitas irradiator bervariasi tergantung penggunaannya. Misalnya aktivitas 1.000 Curie digunakan rumah sakit untuk terapi kanker. Aktivitas 100 ~ 1.000 Curie untuk penelitian dan di atas 10.000 Curie untuk keperluan industri.

Bentuk irradiator yang banyak digunakan ada dua macam, yaitu:

1. Irradiator tak menetap permanen (*Gammacell*), yaitu irradiator berbentuk silinder yang dilengkapi alat kontrol. Seperti terlihat pada Gambar 2.9, irradiator ini dapat bergerak untuk dipindahkan ke tempat yang diinginkan. Pada jenis ini, sumber radiasi ada di dalam tabung silinder yang dilapisi bahan pelindung radiasi. Sampel yang akan diradiasikan diletakkan di atas sumber radiasi (*sample chamber*).
2. Irradiator menetap permanen (*Cave type*), yaitu irradiator yang diletakkan di dalam suatu ruangan yang dirancang khusus untuk keperluan meradiasi bahan. Ruangan ini dilapisi beton penahan radiasi dan pintu khusus yang dirancang sesuai keselamatan radiasi( Gambar 2.10).



**Gambar 2.9 :** Irradiator Tak Menetap Permanen Gammacell. [3]



**Gambar 2.10 :** Irradiator Menetap Permanen Cavetype. [3]

#### 2.2.4. Pesawat Rontgen

Pesawat Rontgen atau pesawat sinar-X adalah piranti yang menghasilkan radiasi sinar-X dengan intensitas yang dapat diatur sesuai kebutuhan. Panjang gelombang sinar-X pada umumnya lebih kecil dari  $10^{-6}$  cm, sedang untuk panjang gelombang radiasi Gamma lebih kecil lagi, sehingga radiasi Gamma mempunyai

energi yang lebih kuat daripada energi sinar-X. Alat ini banyak digunakan untuk keperluan rumah sakit. Pesawat sinar-X ini juga dapat dijumpai di bidang industri dan penelitian sebagai sumber radiasi yang telah banyak memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Jenis sinar-X dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan proses terjadinya sinar-X tersebut, yaitu:

1. Radiasi sinar-X yang dihasilkan akibat perlambatan berkas elektron cepat mengenai anoda. Proses ini disebut pengereman laju elektron atau efek bremsstrahlung. Proses ini menghasilkan sinar-X yang memiliki spektrum berkesinambungan.
2. Radiasi sinar-X yang dihasilkan akibat tumbukan berkas elektron cepat dengan elektron orbital atom anoda. Elektron orbital yang tertumbuk tersebut akan terdepak keluar orbit dan tempatnya akan diisi oleh elektron dari kulit luar. Perpindahan orbit elektron ini disebut efek Auger.

### **2.2.5. Radioisotop**

Radioisotop atau isotop radioaktif merupakan salah satu sumber radiasi buatan yang banyak digunakan karena dapat dibuat sesuai dengan keperluan (Tabel 2.3). Radioisotop dapat dibuat dengan bantuan reaktor nuklir atau dengan cara ditembak dengan akselerator. Selain radioisotop buatan, tentunya terdapat radioisotop alam yang berasal dari radiasi primordial. Sebagai sumber radiasi, radioisotop alam relatif lebih mahal daripada radioisotop buatan. Hal ini berkaitan dengan proses pemurniannya dan tingkat kesulitan pembuatannya.

Pemakaian radioisotop sebagai sumber radiasi pada umumnya dipilih yang berwaktu paro panjang dengan harapan agar radioisotopnya cukup stabil dalam waktu yang lama (Tabel 2.4). Sedangkan pemakaian radioisotop sebagai perunut (*tracer*) biasanya dipilih yang berwaktu paro pendek agar aktivitasnya cepat serupa dengan cacah latar. Pertimbangan biaya juga dipikirkan untuk memesan radioisotop sebagai sumber radiasi.

Pemakaian radioisotop untuk bidang kedokteran mempunyai syarat yang lebih khusus. Hal ini dikarenakan sasaran pemakaiannya adalah manusia.

**Tabel 2.3 : Radioisotop Yang Banyak Dipakai Sebagai Sumber Radiasi. [3]**

No	Radioisotop	Lambang	Waktu paro	Jenis radiasi dan energi (MeV)	Perkiraan harga /Curie ( US \$)
<i>I. Radioisotop Alam</i>					
1.	Polonium 210	Po <sup>210</sup>	138 hari	$\alpha$ 5,304 (100%)	150
2.	Radium 226	Ra <sup>226</sup>	1620 tahun	$\alpha$ 4,777 (94,3%) $\alpha$ 4,589 (5,7%) $\gamma$ 0,188 (4%)	20.000
3.	Radon 222	Rn <sup>222</sup>	3,83 hari	$\alpha$ 5,49	-
<i>II. Radioisotop Buatan</i>					
4.	Caesium 137	Cs <sup>137</sup>	30 tahun	$\beta$ 1,18 (8%) $\beta$ 0,52 (92%) $\gamma$ 0,6616 (82%)	5
5.	Cobalt 60	Co <sup>60</sup>	5,27 tahun	$\beta$ 0,314 (max) $\gamma$ 1,332 $\gamma$ 1,173	1 – 4
6.	Tritium	H <sup>3</sup>	12,26 tahun	$\beta$ 0,018 (max)	7 – 30
7.	Phosphor 32	P <sup>32</sup>	14,22 hari	$\beta$ 1,710 (max)	0,70
8.	Strontium 90	Sr <sup>90</sup>	28 tahun	$\beta$ 0,544 (max)	7,50
9.	Yttrium 90	Y <sup>90</sup>	64 jam	$\beta$ 2,25 (max)	7,50
10.	Sulfur 35	S <sup>35</sup>	87,2 hari	$\beta$ 0,167 (max)	1,50

**Tabel 2.4 : Proses Pembentukan dan Peluruhan Radioisotop. [3]**

No	Radioisotop	Proses Pembentukan	Sumber	Proses Peluruhan
1.	Po <sup>210</sup>	- Bi <sup>209</sup> (n, $\gamma$ ) Bi <sup>210</sup> (RaE) $\rightarrow$ Po <sup>210</sup> ( $\beta$ , 5 hari)	Alam, Reaktor	Po <sup>210</sup> $\rightarrow$ Pb <sup>206</sup> (stabil) ( $\alpha$ , $\gamma$ )
2.	Ra <sup>226</sup>	-	Alam	Ra <sup>226</sup> $\rightarrow$ Rn <sup>222</sup> (aktif) ( $\alpha$ , $\gamma$ )
3.	Rn <sup>222</sup>	Ra <sup>226</sup> $\rightarrow$ Rn <sup>222</sup> (gas)	Alam	Rn <sup>222</sup> $\rightarrow$ Po <sup>218</sup> (aktif) ( $\alpha$ )
4.	Cs <sup>137</sup>	Pemisahan dari produk fisi	Reaktor	Cs <sup>137</sup> $\rightarrow$ Ba <sup>137</sup> (stabil) ( $\beta$ , $\gamma$ )
5.	Co <sup>60</sup>	Co <sup>60</sup> (n, $\gamma$ ) Co <sup>60</sup>	Reaktor	Co <sup>60</sup> $\rightarrow$ Ni <sup>60</sup> (stabil) ( $\beta$ , $\gamma$ )
6.	H <sup>3</sup>	Li <sup>6</sup> (n, $\alpha$ ) H <sup>3</sup>	Reaktor	H <sup>3</sup> $\rightarrow$ He <sup>3</sup> (stabil) ( $\beta$ )
7.	P <sup>32</sup>	P <sup>31</sup> (n, $\gamma$ ) P <sup>32</sup> S <sup>32</sup> (n, p) P <sup>32</sup>	Reaktor	P <sup>32</sup> $\rightarrow$ S <sup>32</sup> (stabil) ( $\beta$ )
8.	Sr <sup>90</sup>	Pemisahan dari produk fisi	Reaktor	Sr <sup>90</sup> $\rightarrow$ Y <sup>90</sup> $\rightarrow$ Zr <sup>90</sup> (stabil) ( $\beta$ ) ( $\beta$ )
9.	S <sup>35</sup>	S <sup>35</sup> (n, p) S <sup>35</sup> S <sup>35</sup> (n, $\gamma$ ) S <sup>35</sup>	Reaktor	S <sup>35</sup> $\rightarrow$ Cl <sup>35</sup> (stabil) ( $\beta$ )

Syarat-syarat pemakaian radioisotop dalam bidang kedokteran antara lain:

1. Radioisotop harus berwaktu paro pendek.
2. Radioisotop harus mudah dibuat dan disiapkan.
3. Radioisotop harus teruji baik secara klinis.
4. Radioisotop harus dapat segera keluar melalui sekresi.
5. Radioisotop harus aman dan tidak mengendap atau menuju organ kritis.

### **2.3. APLIKASI TEKNOLOGI NUKLIR DALAM BIDANG ENERGI DI NEGARA-NEGARA YANG TELAH MENERAPKAN PLTN**

Aplikasi teknologi nuklir dalam bidang energi adalah pemanfaatan yang paling awal dilakukan dibandingkan aplikasi teknologi nuklir dalam bidang lainnya. Pemanfaatan dalam bidang energi ini merupakan mata rantai keberhasilan melakukan reaksi inti terkendali. Reaksi inti tak terkendali memang sudah dibuktikan terlebih dahulu keberhasilannya lewat pembuatan bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki (Jepang) pada tahun 1945 yang mengakhiri Perang Dunia II. Aplikasi yang terakhir ini, yaitu membuat bom atom, diharapkan tidak akan pernah dilakukan lagi, karena menimbulkan malapetaka dan kesengsaraan bagi umat manusia.

Pada reaksi inti yang terjadi di dalam reaktor nuklir, bahan bakar atau bahan fisil yang bereaksi dengan neutron akan menghasilkan beberapa unsur radioaktif, neutron baru dan energi yang sangat tinggi, seperti pada reaksi fisi yang telah diuraikan terdahulu.

Energi yang tinggi yang dihasilkan pada reaksi tersebut di atas dimanfaatkan sebagai sumber panas yang pada proses berikutnya mirip dengan pemanfaatan sumber panas konvensional. Panas yang dihasilkan oleh energi nuklir tersebut sangat tinggi, jauh lebih tinggi daripada panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batubara).

Sebagai contoh penghitungan energi nuklir yang sangat tinggi hasil dari reaksi inti adalah sebagai berikut ini.

Misalkan 1 gram  $U^{235}$  bereaksi inti seluruhnya, energi yang dihasilkan:

Jumlah atom  $U^{235} = m/A \times N_A$

$$\begin{aligned}
 N_A &= \text{Bilangan Avogadro} = 6,025 \times 10^{23} \text{ atom/grat} \\
 &= \{(1 \text{ gram})/(235 \text{ gram})\} \times 6,025 \times 10^{23} \text{ atom/grat} \\
 &= 2,56 \times 10^{21} \text{ atom}
 \end{aligned}$$

Padahal diketahui bahwa pada setiap pembelahan atom  $U^{235}$  akan dibebaskan energi sebesar 200 MeV/atom, seperti tampak pada Tabel 2.5 berikut ini:

**Tabel 2.5:** Energi fisi  $U^{235}$ . [3]

Fraksi pembelahan	Energi (MeV)
Energi kinetik fragmen fisi	167
Energi kinetik neutron fisi	5
Prompt radiasi Gamma	7
Energi peluruhan radiasi Beta	5
Energi peluruhan radiasi Gamma	5
Energi neutrino	11
<b>Total energi fisi <math>U^{235}</math></b>	<b>200</b>

sehingga pada pembelahan 1 gram  $U^{235}$  akan dihasilkan energi panas sebesar:

$$\begin{aligned}
 E &= 2,56 \times 10^{21} \times 200 \text{ MeV/atom} \\
 &= 5,12 \times 10^{23} \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

Padahal, konversi energi:  $1 \text{ MeV} = 3,83 \times 10^{-14} \text{ cal}$ . Jadi, energi yang dibebaskan pada reaksi pembelahan  $U^{235}$  adalah:

$$\begin{aligned}
 E &= 5,12 \times 10^{23} \times 3,83 \times 10^{-14} \text{ cal.} \\
 &= 1,96 \times 10^{10} \text{ cal.} = 2,00 \times 10^{10} \text{ cal. (dibulatkan)}
 \end{aligned}$$

Sekarang kalau dibandingkan dengan ledakan granat yang berisi serbuk TNT 50 gram adalah sebagai berikut :

Granat berisi 50 gram TNT menghasilkan panas 50.000 kalori =  $5 \times 10^4 \text{ cal}$ .

Energi untuk reaksi inti 1 gram  $U^{235}$  menghasilkan panas  $2,00 \times 10^{10}$  kalori ini sama dengan serbuk TNT sebanyak  $= 50 \times 2,00 \times 10^{10} / 5 \times 10^4 \text{ gram}$   
 $= 20.000.000 \text{ gram TNT}$   
 $= 20 \text{ ton}$



Jadi, energi yang dihasilkan 1 gram  $U^{235}$  sama dengan energi ledakan 20 ton TNT. Energi nuklir ini dapat juga disetarakan dengan bahan bakar fosil (minyak bumi dan batubara) sebagai berikut:

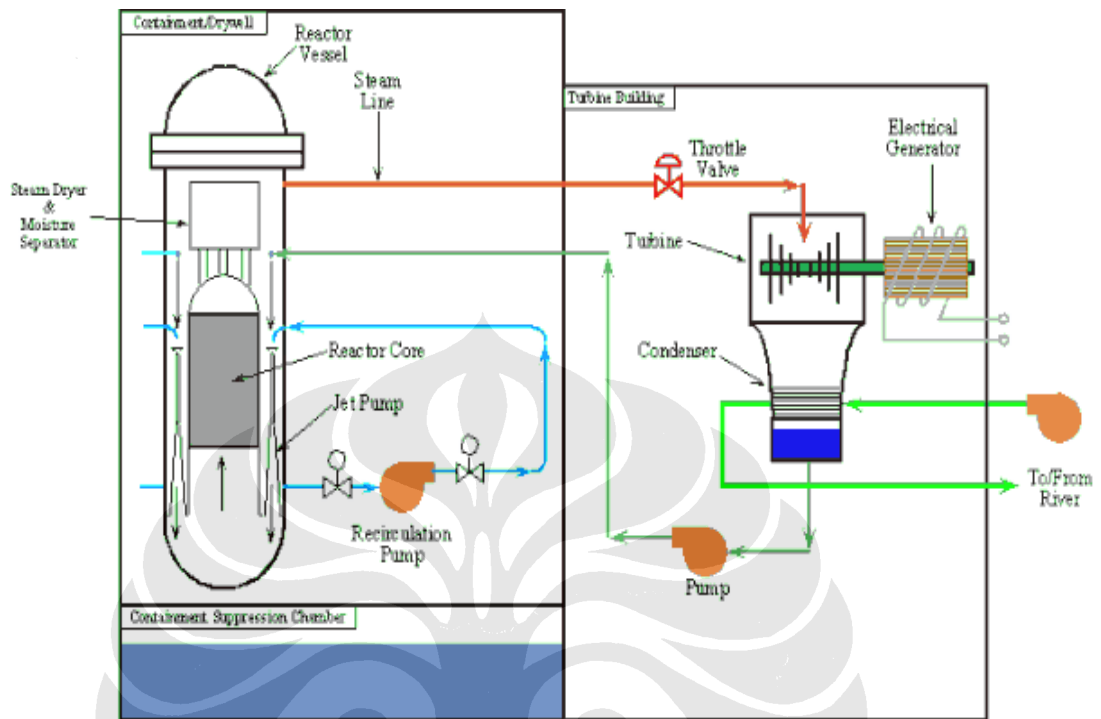
1 gram Uranium = 2,5 ton batubara = 17.500 liter minyak bumi = 20 ton TNT.

Dengan melihat kesetaraan energi tersebut di atas, bisa dibayangkan betapa dahsyatnya energi yang diperoleh dari reaksi nuklir itu. Atas dasar kenyataan itu, manusia berpikir untuk memanfaatkan energi nuklir guna memenuhi kebutuhan energi pengganti bahan bakar fosil minyak bumi dan batubara. Energi nuklir antara lain diperoleh dari reaksi inti Uranium dan Uranium ini diperoleh dari batuan Uranium.

Mengingat akan besarnya energi yang diperoleh dari reaksi nuklir tersebut, serta mengingat semakin berkurangnya energi fosil, saat ini energi nuklir merupakan energi alternatif terbaik sebagai penggantinya. Oleh karena itu, pembangunan reaktor nuklir untuk pembangkit tenaga listrik di dunia (PLTN), berkembang pesat. Selain itu, perkembangan PLTN juga didukung oleh harga bahan baku Uranium yang relatif masih murah dan cadangannya masih tersedia melimpah. Hal lain yang mendukung perkembangan PLTN adalah pemakaian energi nuklir untuk pembangkit tenaga listrik relatif bersih dan tidak menimbulkan pencemaran lingkungan. Lain halnya dengan pemakaian bahan bakar fosil yang apabila digunakan untuk pembangkit tenaga listrik akan menimbulkan dampak pencemaran lingkungan yang cukup parah. Alasan lain adalah bahwa harga bahan bakar fosil relatif mahal dan cadangannya pun semakin menipis. Dengan demikian, orang harus mulai berpikir tentang energi alternatif yang dalam hal ini adalah energi nuklir.

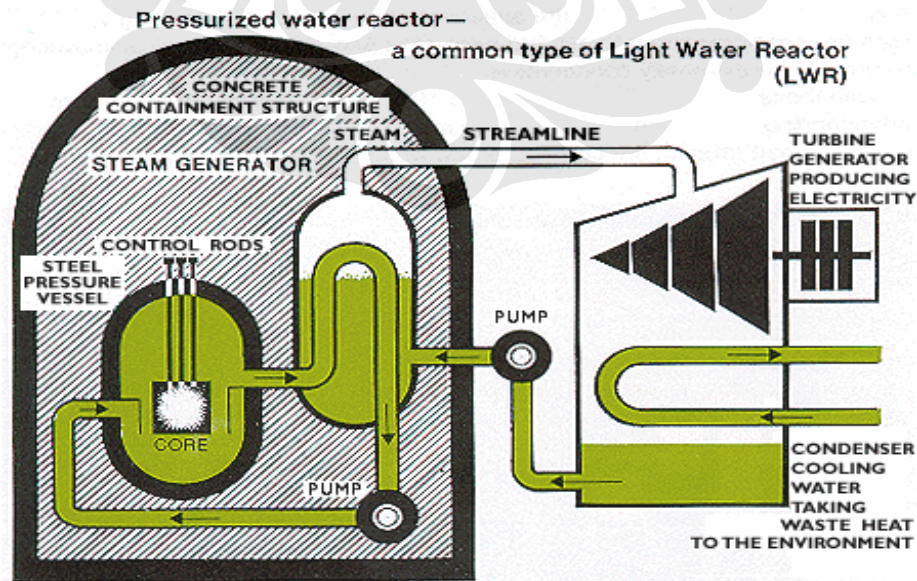
Jenis-jenis PLTN beranekaragam. Penggolongan jenis PLTN ini atas dasar sistem reaktor yang digunakan di dalam PLTN tersebut. Beberapa jenis sistem reaktor yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga nuklir dan telah terbukti baik jaminan keselamatannya, antara lain adalah sebagai berikut:(Gambar 2.11 sampai 2.15)

1. **Boiling Water Reactor (BWR) atau Reaktor Air Mendidih (RAM).**



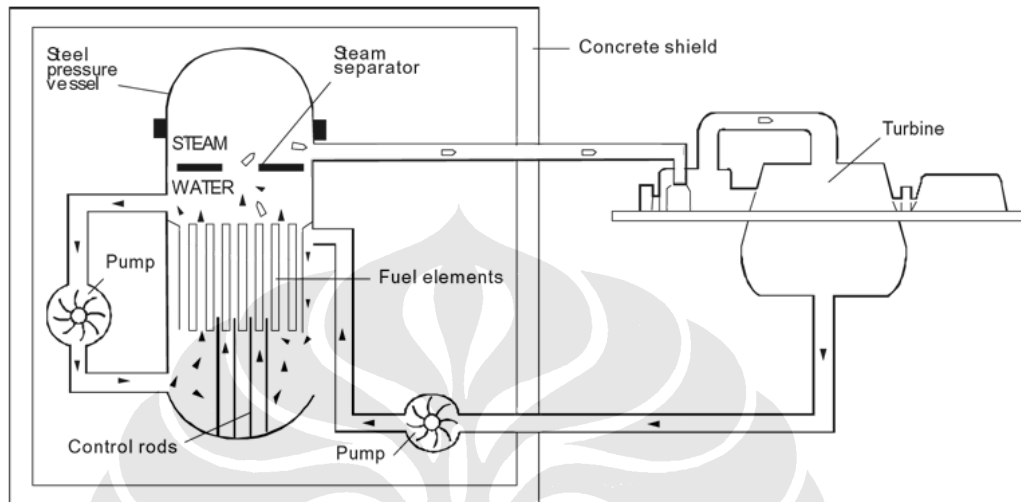
Gambar 2.11: Reaktor Air Mendidih. [4]

2. **Pressurized Water Reactor (PWR) atau Reaktor Air Tekan (RAT).**



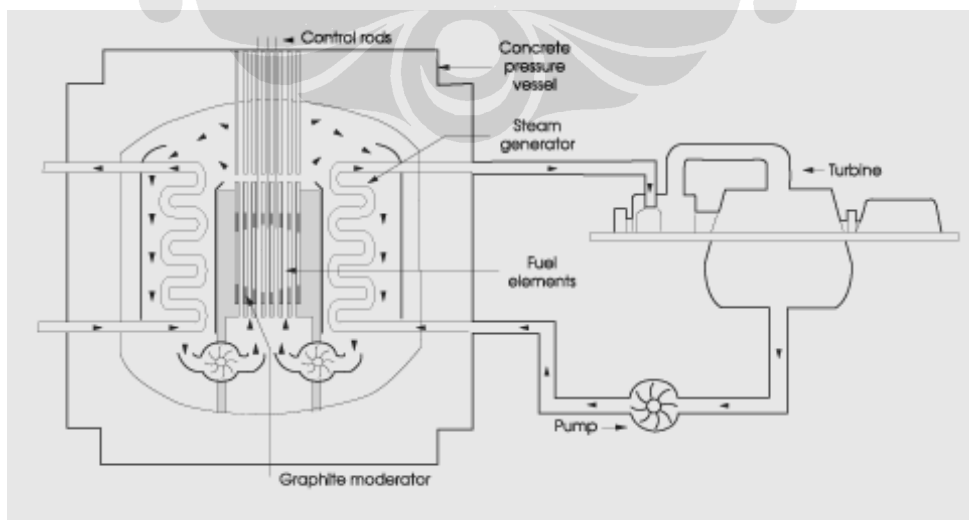
Gambar 2.12 : Reaktor Air Tekan. [5]

3. *Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR)* atau Reaktor Air Berat Tekan (RABT).



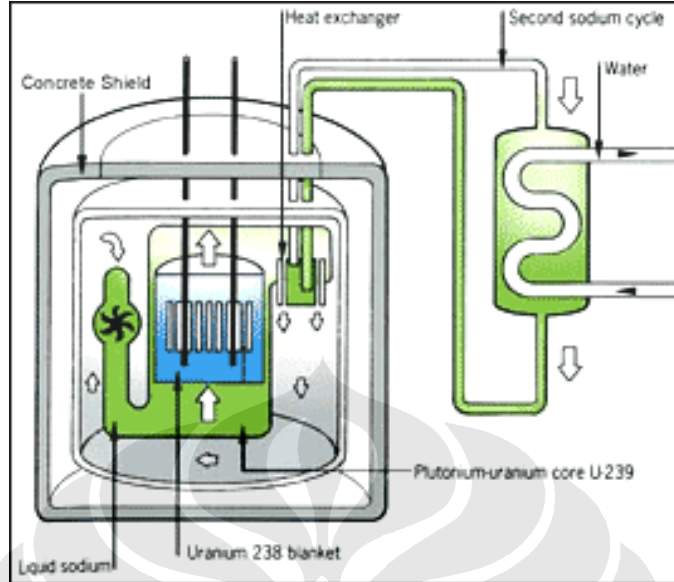
Gambar 2.13 : Reaktor Air Berat Tekan. [5]

4. *High Thermal Gas Cooled Reactor (HTGR)* atau Reaktor Termal Berpendingin Gas (RTBG).



Gambar 2.14 : Reaktor Termal Berpendingin Gas [5]

## 5. *Fast Breeder Reactor (FBR)* atau Reaktor Pengembang Biak (RPB).



**Gambar 2.15** : Reaktor Pengembang Biak. [5]

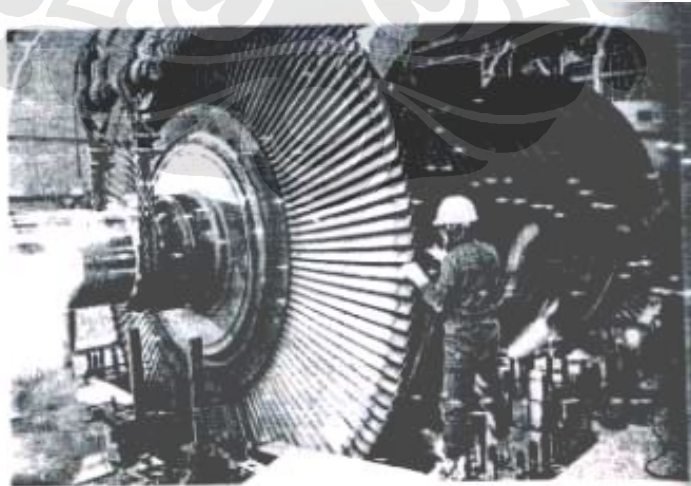
Pada PLTN jenis Reaktor Air Tekan (RAT), air dingin masuk ke reaktor melalui dasar teras, mengalir di antara elemen-elemen bahan bakar nuklir. Karena reaksi inti, elemen-elemen bahan bakar nuklir menjadi panas, maka air yang mengalir di antara celah-celah elemen bahan bakar tersebut akan ikut panas. Elemen bahan bakar nuklir berupa tabung zirkonium yang berisi uranium dioksida. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar yang diperkaya. Bahan bakar yang diperkaya adalah bahan yang mengandung isotop  $U^{235}$  dalam jumlah yang lebih banyak dari biasanya.  $U^{235}$  adalah isotop uranium yang dapat bereaksi fisi. Sebagian besar uranium terdiri atas isotop  $U^{238}$  dan hanya sebagian kecil saja (kurang lebih 0,7%) berupa isotop  $U^{235}$ . Walaupun demikian, kandungan  $U^{235}$  dapat ditingkatkan menjadi 3% di pabrik pemerikaya uranium.

Pada saat air mengalir ke atas dan melewati celah-celah bahan bakar, air dapat mencapai suhu lebih dari  $300^{\circ}C$ . Walaupun mencapai suhu tersebut, air yang mengalir itu tidak mendidih, karena teras reaktor diberi tekanan yang sangat tinggi dengan menggunakan alat pemberi tekanan (*pressurizer*). Air panas yang tidak mendidih kemudian mengalir ke alat penukar kalor dan memindahkan kalornya ke sirkit air kedua yang bertekanan lebih rendah. Karena tekanannya lebih rendah, maka air pada sirkit kedua akan mendidih dan menghasilkan uap.

Uap yang dihasilkan inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin dan turbin ini juga yang menggerakkan generator listrik, sehingga diperoleh tenaga listrik. Melalui transformator dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), tenaga listrik ini disalurkan kepada konsumen.

Air dari sirkit pertama, setelah menyerahkan kalornya ke air pada sirkit kedua, akan menjadi dingin dan lalu dialirkan kembali ke teras reaktor. Uap air pada sirkit kedua, setelah dihembuskan ke turbin (Gambar 2.16), akan didinginkan/diembunkan oleh alat pengembun (*condenser*, sebagai sirkit ketiga), lalu akan kembali berfungsi sebagai alat penukar panas (*heat exchanger*).

Teras reaktor dan alat penukar panas tempat terbentuknya uap, ditempatkan di bawah suatu sungkup atau dikurung dalam perisai yang terbuat dari beton. Sungkup beton ini dimaksudkan sebagai garis pertahanan kedua jika terjadi kebocoran. Sedangkan yang berfungsi sebagai garis pertahanan pertama adalah reaktor dan alat penukar panas itu sendiri. Jika diperhatikan, baik sistem aliran air pada sirkit pertama maupun kedua, semuanya merupakan sirkit tertutup, sehingga tidak akan ada zat radioaktif yang keluar ke lingkungan reaktor. Atas dasar pengertian ini, PLTN merupakan pembangkit listrik bersih dan tidak mencemari lingkungan, serta sistem keamanannya menerapkan pertahanan ganda, sehingga dengan baik mampu menjamin keselamatan pengoperasiannya.



**Gambar 2.16** : Turbin PLTN Dalam Perawatan. [3]

Adapun uap yang keluar dari menara adalah uap air dari sungai atau danau (air pada sirkit ketiga) yang digunakan untuk mendinginkan/mengembunkan uap air pada sirkit kedua yang menggerakkan turbin.

Pada saat bahan bakar bereaksi inti dengan neutron, terjadi pengumpulan limbah bahan bakar. Hal ini akan mengganggu unjuk kerja bahan bakar. Sebelum semua  $U^{235}$  habis dalam reaksi inti, bahan bakar tersebut diganti dengan bahan bakar baru.

Bahan bakar bekas tersebut disimpan sementara di dalam air untuk menurunkan tingkat radioaktivitasnya yang memang tinggi. Setelah beberapa saat, bahan bakar bekas tersebut dikirim ke tempat pemrosesan daur ulang. Pada proses daur ulang ini,  $U^{235}$  yang belum terbakar (belum bereaksi inti) diambil untuk kemudian digunakan lagi sebagai bahan bakar. Selain itu, di dalam limbah bahan bakar bekas, terdapat pula isotop baru yang sebelumnya tidak ada, yaitu  $Pu^{239}$ . Plutonium ini berasal dari reaksi inti neutron yang keluar dari pembelahan  $U^{235}$  dengan isotop  $U^{238}$  yang terdapat pada bahan bakar.  $Pu^{239}$  ini dapat menjadi bahan bakar baru bagi PLTN lainnya.

Pemakaian PLTN sebagai pemenuhan kebutuhan energi listrik dunia pada saat ini sudah sedemikian pesat perkembangannya. Negara-negara industri maju sangat mengandalkan energinya dari energi nuklir ini. Minyak bumi dan batubara pada saat ini cadangannya semakin menipis, tenaga air terbatas, sehingga PLTN merupakan tumpuan harapan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan. Minyak bumi dan batubara apabila dibakar hanya untuk menghasilkan tenaga listrik, sangat disayangkan, karena akan mempercepat habisnya cadangan kedua bahan bakar tersebut. Di samping itu, pembakaran bahan bakar fosil tersebut menimbulkan polusi yang merusak lingkungan.

Beberapa negara yang sudah membangun dan memanfaatkan PLTN untuk memenuhi kebutuhan tenaga listriknya, yang telah diberikan pada Tabel 2.1 pada uraian terdahulu.

Sisa limbah yang sudah tidak dapat dimanfaatkan lagi masih mempunyai tingkat radioaktivitasnya yang tinggi. Setelah melalui proses pengolahan limbah radioaktif, limbah tersebut kemudian disimpan secara lestari untuk jangka waktu yang sangat panjang. Pada saat ini, pengolahan limbah radioaktif bagi negara-

negara maju sudah menjadi ajang bisnis tersendiri. Pengelolaan limbah radioaktif masih memiliki nilai ekonomis.

Keberhasilan pemakaian energi nuklir untuk pembuatan pembangkit tenaga listrik (PLTN) telah merintis jalan ke arah pembuatan mesin-mesin berbasis energi nuklir lainnya. Mesin-mesin tersebut antara lain digunakan untuk penggerak kapal dagang, kapal selam dan kapal induk. Kapal-kapal tersebut mendapat tenaga dari reaktor nuklir yang ada di dalam kapal. Jenis reaktor yang digunakan pada umumnya adalah Reaktor Air Tekan (RAT) yang berukuran lebih kecil dari yang ada di PLTN. Beberapa kapal bertenaga nuklir bahkan memiliki reaktor nuklir khusus yang dirancang untuk bekerja terus menerus selama 7 tahun tanpa harus mengisi bahan bakar (nuklir) baru. Keadaan ini secara tekno-ekonomis tentu akan dapat bersaing keras dengan kapal konvensional berbahan bakar fosil.

#### **2.4. PROTEKSI RADIASI NUKLIR**

Proteksi radiasi nuklir adalah bagaiam terpenting yang harus diketahui dalam setiap pekerjaan yang melibatkan penggunaan zarah radiasi ataupun zat radioaktif baik yang berupa sumber radioaktif tertutup maupun sumber radioaktif terbuka. Dalam setiap pemakaian zarah radiasi atau zat radioaktif, masalah proteksi radiasi harus diutamakan karena menyangkut keselamatan manusia. Dalam setiap penggunaannya, harus ada tata kerja ataupun petunjuk pelaksanaan yang jelas demi terjaminnya keselamatan manusia dan lingkungan. Bahkan, dalam setiap penggunaannya, harus ada jaminan bahwa manfaat yang dihasilkan jauh lebih banyak daripada risiko yang mungkin ditimbulkannya. Dengan kata lain, penggunaan zarah radiasi atau zat radioaktif dalam setiap kegiatan dapat dijamin aman bagi manusia dan lingkungan.

Interaksi radiasi dengan materi adalah permasalahan besar yang harus diketahui sebelum beranjak menuju proteksi radiasi. Pada pembahasan selanjutnya akan sedikit dibahas mengenai interaksi radiasi dengan materi. Manusia secara umum adalah materi. Tetapi, karena memiliki komposisi yang lain dan khusus dibandingkan dengan komposisi materi biasa, maka segala interaksi radiasi terhadapnya harus lebih diutamakan. Untuk itu, akan dibahas lebih khusus dan

perlu adanya prosedur kerja dan uraian tentang keselamatan kerja radiasi yang akan memberikan ketenangan dan kemantapan hati bila hendak bekerja dengan radiasi yang memberikan banyak manfaat bagi peningkatan kesejahteraan umat manusia.

#### **2.4.1. Interaksi Radiasi dengan Materi**

Pada subbab ini, akan dijelaskan mengenai interaksi radiasi dengan materi secara umum. Berdasarkan jenis dan sifat radiasinya, interaksi radiasi dibagi menjadi tiga hal, yaitu:

##### *Interaksi zarah radiasi bermuatan (radiasi Alpha dan Beta) dengan materi.*

Termasuk dalam kelompok ini adalah zarah radiasi Alpha yang merupakan inti Helium,  ${}^2\text{He}^4$ , yang bermuatan positif dan Beta yang merupakan elektron dan positron. Interaksinya dengan materi akan menimbulkan tiga efek, yaitu:

1. Ionisasi : Peristiwa tertariknya positron oleh elektron.
2. Eksitasi : Peristiwa terganggunya struktur atom materi.
3. Absorpsi : Peristiwa terserapnya zarah radiasi oleh materi.

##### *Interaksi zarah radiasi tak bermassa dan tak bermuatan (radiasi Gamma dan sinar-X) dengan materi.*

Radiasi Gamma dan sinar-X memiliki sifat yang sama. Perbedaannya terletak pada panjang gelombang dan asal radiasinya. Panjang gelombang radiasi Gamma lebih pendek daripada sinar-X, sehingga energinya lebih tinggi dan daya tembusnya lebih kuat. Radiasi Gamma berasal dari inti atom, sedangkan radiasi sinar-X berasal dari kulit elektron. Interaksi yang akan terjadi jika bersinggungan dengan materi adalah hampir tidak ada hambatan, mengingat keduanya tak bermassa dan tak bermuatan. Tetapi, ada tiga efek yang dihasilkan, antara lain:

1. Efek fotolistrik : Peristiwa terdepaknya elektron keluar dari inti atom dengan membawa sejumlah energi kinetik.



2. Efek Compton : Peristiwa terbawanya sisa energi yang tidak diberikan pada elektron melalui radiasi Gamma dan sinar-X yang terhambur.
3. Efek Produksi Pasangan : Peristiwa penyerahan seluruh energi yang dimiliki radiasi Gamma dan sinar-X pada materi yang dikenai dan atom materi mengubahnya menjadi sepasang elektron dan positron.

Pada prakteknya, ionisasi pun terjadi dalam interaksi radiasi Gamma dan sinar-X. Hal tersebut dimungkinkan karena adanya elektron yang dihasilkan dari interaksi radiasi keduanya dengan materi yang menimbulkan ketiga efek di atas. Elektron yang dihasilkan dari ketiga efek tersebut yang mengionisasi atom atau molekul atom.

*Interaksi zarah radiasi bermassa dan tak bermuatan (radiasi Neutron) dengan materi.*

Seperti telah diketahui, neutron adalah zarah yang tak bermuatan tetapi bermassa. Karena sifat khasnya tersebut, maka dalam interaksinya dengan materi lebih banyak dipengaruhi oleh tingkat energi neutron.

Selain itu, interaksi radiasi neutron dengan materi juga dipengaruhi oleh beberapa hal, antara lain:

1. Tingkat Energi Neutron
  - Neutron thermal ( $E = 0,025 \text{ MeV}$ )
  - Neutron intermediate/epithermal/resonansi ( $0,5 \text{ eV} \leq E \leq 10 \text{ keV}$ )
  - Neutron cepat ( $10 \text{ keV} \leq E \leq 10 \text{ MeV}$ )
  - Neutron relativistik ( $E \gg 10 \text{ MeV}$ )
2. Tampang Lintang Neutron : Probabilitas neutron dapat bertumbukan dengan materi.
3. Tampang Lintang Penghapusan Neutron : Atenuasi Neutron yang tidak lain adalah Neutron yang seakan hilang/terhapus karena neutron cepat yang menumbuk atom Hidrogen.

4. Ionisasi : Reaksi samping yang terjadi ketika interaksi. Misalnya reaksi  $(n, \gamma)$ , reaksi  $(n, \alpha)$ , atau reaksi  $(n, p)$ .
5. Absorpsi Neutron : Berkaitan dengan berkas neutron yang mengenai suatu materi.
6. Aktivasi Neutron : Inti atom yang tidak stabil (radioaktif) yang terjadi karena atenuasi neutron yang terserap inti atom tersebut.

#### **2.4.2. Pengaruh Radiasi Nuklir Terhadap Manusia**

Pembahasan interaksi radiasi dengan materi khusus berarti membahas masalah pengaruh radiasi terhadap manusia dan pembahasan ini termasuk bagian yang penting, karena menyangkut masalah yang akan dihadapi dalam proteksi radiasi dan keselamatan manusia yang akan memanfaatkan teknologi nuklir bagi kesejahteraan umat manusia.

Untuk lebih memudahkan penjelasannya, pembahasan pengaruh radiasi terhadap manusia ini akan dibagi menjadi dua, yakni Proses Kerusakan Akibat Radiasi, Tahap dan Kerusakan Radiasi. Kedua hal tersebut akan dijelaskan kemudian.

##### *2.4.2.1. Proses Kerusakan Akibat Radiasi*

Susunan tubuh manusia sangat kompleks. Selain itu, sebagian besar tubuh manusia terdiri dari air yang sangat mudah bereaksi bila dikenai radiasi. Setiap organ tubuh manusia terdiri dari dua atau lebih jaringan. Jaringan tubuh manusia ada empat macam, yaitu jaringan epitelial, connective, otot, dan syaraf. Masing-masing jaringan tersebut mempunyai fungsi dan tugas masing-masing pula.

Bagian terkecil dari jaringan adalah sel. Bagian-bagian terbesar pada sel antara lain adalah inti sel (nukleus), membran inti sel, sitoplasma, dan membran sel. Inti sel dan sitoplasma merupakan bagian sel yang sangat penting dan sebagian besar berupa air. Tercatat bahwa kadar air pada kedua bagian tersebut mencapai 70% dari keseluruhan sel. Secara kimiawi, inti sel sangat aktif. Dalam keadaan normal, pertumbuhan sel dikendalikan oleh inti

sel. Inti sel juga mengendalikan perbaikan sel-sel yang rusak. Hal-hal tersebut yang menjadikan begitu pentingnya peranan inti sel.

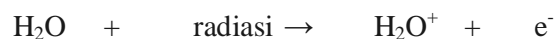
Sitoplasma adalah bagian sel yang berupa cairan tak berwarna yang berfungsi mengeluarkan enzim dan sekaligus mengatur penyerapan dan pengeluaran dalam sel. Regenerasi sel terjadi setiap saat karena sel memiliki batas umur, dari beberapa jam hingga beberapa tahun. Untuk menjaga kesinambungan regenerasi sel dan supaya fungsi sel tetap berjalan baik, maka sel akan membelah dalam beberapa tingkatan. Pada saat terjadi pembelahan sel, inti dan benang kromosom di dalam inti yang sudah tertentu jumlahnya juga akan ikut membelah secara merata. Benang kromosom ini sangat penting karena berfungsi sebagai pembawa sifat genetik.

Sel manusia dalam keadaan normal mengandung 46 buah kromosom. Kromosom pembawa sifat ini terdiri atas molekul-molekul Deoxyribo Nucleic Acid (DNA) dan protein. Apabila terdapat kerusakan sel, terlebih lagi jika kromosomnya yang terganggu, kerusakan itu akan berdampak fatal bagi organ tubuh manusia secara keseluruhan.

Kerusakan sel manusia dapat disebabkan oleh terkena senyawa kimia tertentu, terpapar oleh panas, terpapar oleh sinar tertentu, terpapar oleh radiasi nuklir, dan lain-lain. Tetapi, kerusakan sel manusia oleh radiasi nuklir berbeda dengan kerusakan yang diakibatkan oleh sebab lainnya. Pengaruh radiasi terhadap manusia adalah melalui kerusakan sel dan kerusakan ini melalui empat tahap, yaitu:

a. Kerusakan karena Proses Ionisasi

Apabila tubuh manusia terpapar oleh radiasi, sel akan menyerap energi radiasi. Proses ini berlangsung dengan sangat cepat, sekitar  $10^{-16}$  detik. Karena sebagian besar sel terdiri atas air, maka proses yang pertama kali terjadi adalah ionisasi:

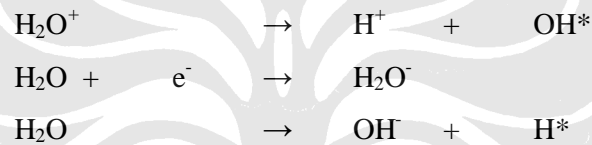


Air di dalam sel akan terurai menjadi ion positif  $\text{H}_2\text{O}^+$  dan negatif  $\text{e}^-$ . Ion-ion yang terjadi bersifat reaktif dan akan menyerang molekul air

lainnya dan akan terjadi ionisasi sekunder (lanjutan). Begitu seterusnya, ion-ion sekunder akan menyerang molekul air dan akan terjadi ionisasi tersier. Ionisasi ini merupakan awal kerusakan molekul air di dalam sel.

b. Kerusakan karena Proses Kimiafisika

Akibat terjadinya proses ionisasi primer, sekunder, dan tersier, maka kerusakan molekul air di dalam sel akan berlanjut. Hanya dalam waktu sangat singkat, dalam orde  $10^{-6}$  detik, ion-ion yang terbentuk akan bereaksi dengan molekul-molekul air yang belum terionisasi. Reaksi tersebut menghasilkan beberapa produk baru yang terlihat dalam reaksi-reaksi sebagai berikut:



Selain terbentuk ion-ion baru, pada proses kimiafisika ini terbentuk juga radikal bebas, yaitu  $\text{OH}^*$  dan  $\text{H}^*$ . Radikal bebas secara elektrokimia tidak bermuatan listrik, tetapi sangat reaktif sehingga mudah bereaksi. Radikal bebas  $\text{OH}^*$  juga akan saling bereaksi antarsesamanya, sehingga membentuk:



$\text{H}_2\text{O}_2$  adalah peroksida yang merupakan oksidator kuat, sehingga akan mudah menyerang molekul lain.

c. Kerusakan karena Proses Biokimia

Dalam proses biokimia ini, reaksi berlangsung singkat, hanya dalam beberapa detik saja. Dalam detik-detik yang singkat tersebut, radikal-radikal bebas dan peroksida tadi akan menyerang molekul organik sel. Selain itu, juga menyerang inti sel yang mengandung

kromosom-kromosom. Molekul-molekul penting yang diserang antara lain:

1. Molekul protein

Molekul protein yang terdiri atas gugus karboksil dan gugus amino akan putus ikatan rantai panjangnya, sehingga fungsi protein akan rusak. Molekul protein yang putus akan menjadi terbuka untuk dapat bereaksi dengan molekul lainnya.

2. Molekul enzim

Radikal bebas dan peroksida dapat merusak struktur biokimia molekul enzim. Hal ini dapat menyebabkan fungsi enzim terganggu dan hilangnya daya katalis molekul enzim dalam reaksi biokimia.

3. Molekul lemak

Ikatan rangkap yang terdapat pada lemak akan dirusak oleh radikal bebas dan peroksida yang sangat reaktif.

4. Molekul karbohidrat

Molekul karbohidrat yang merupakan sumber tenaga pada tubuh dapat rusak dan terurai menjadi molekul yang lebih kecil karena terpapar radiasi.

5. Molekul DNA

Radiasi nuklir dapat merangsang proses biokimia yang tidak sebagaimana mestinya, sehingga timbul mutasi genetik yang mengakibatkan sifat pembawa keturunan berubah. Mutasi ini dapat terlihat pada keturunannya.

6. Kromosom

Kerusakan yang dialami mirip dengan molekul DNA. Jumlah kromosom dan pembawa sifat genetik dapat berubah karena paparan radiasi nuklir tersebut.

d. Kerusakan karena Proses Biologis

Kerusakan ini merupakan kerusakan terakhir setelah proses-proses terdahulunya. Kerusakan karena proses biologis ini dapat bermacam-

macam, dari yang berorde beberapa puluh menit hingga beberapa puluh tahun. Hal ini tergantung pada tingkat kerusakan sel akibat proses-proses sebelumnya. Kerusakan sel dapat mengakibatkan:

1. Kematian sel secara langsung karena radiasi yang sangat kuat.
2. Pembelahan sel menjadi terhambat atau tertunda.
3. Terjadi perubahan permanen pada sel anak setelah terjadi pembelahan pada sel induk.

#### *2.4.2.2. Tahap Kerusakan Akibat Radiasi*

Radiasi terhadap tubuh manusia mengakibatkan terjadinya kerusakan sel yang secara umum dapat digolongkan menjadi beberapa tahap, yaitu Tahap kerusakan efek somatik dan efek tertunda. Kedua macam tahap kerusakan tersebut merupakan kelanjutan dari proses kerusakan sel sebelumnya.

##### *a. Efek Somatik*

Pengaruh efek somatik langsung tampak pada orang yang terpapar radiasi. Kerusakan organ tubuh karena efek somatik disebabkan karena sel-sel pembentuk jaringan tidak membelah lagi, pembelahannya tertunda, atau pembelahannya tidak normal, sehingga jaringan yang terpapar radiasi tersebut mati. Faktor-faktor fisis yang mempengaruhi terjadinya efek somatik antara lain adalah:

1. Jenis radiasi yang memapar tubuh.
2. Banyaknya dosis serap yang diterima oleh organ tubuh.
3. Waktu paparan yang diterima oleh organ tubuh.
4. Distribusi dosis radiasi.

Efek somatik yang akibatnya tampak dalam waktu singkat atau relatif tidak terlalu lama, antara lain:

1. Kerusakan pada sistem syarat pusat.
2. Kerusakan pada sistem pencernaan.
3. Kerusakan pada sumsum tulang/sel-sel darah.
4. Kerusakan pada organ reproduksi.
5. Kerusakan kelenjar thyroid.

6. Kerusakan mata.
7. Kerusakan paru-paru.
8. Kerusakan ginjal.

b. Efek Tertunda

Efek tertunda sebenarnya termasuk efek somatik yang tertunda. Efek ini juga disebut efek stokastik. Efek ini memerlukan waktu untuk dapat diketahui akibatnya. Karena tenggang waktu yang lama tersebut, maka tidak mudah diketahui kelainan yang terjadi adalah hasil radiasi nuklir atau sebab-sebab lainnya. Beberapa efek tertunda karena radiasi antara lain adalah:

1. Neoplasma (perubahan bentuk atau pertumbuhan sel).
2. Katarak.
3. Kemandulan.
4. Bekurangnya usia harapan hidup.
5. Hambatan pada pertumbuhan.

c. Efek Genetik

Radiasi dapat menimbulkan efek genetik dan hal ini tampak akibatnya setelah beberapa generasi. Sebenarnya, efek genetik juga merupakan efek somatik yang tertunda, sehingga sering juga disebut hereditary effects. Secara teoritis, kromosom di dalam sel memang dapat berubah atau mengalami mutasi karena radiasi. Hal ini tampak jelas pada hasil eksperimen terhadap tanaman dan hewan percobaan. Akan tetapi, khusus untuk manusia, masih harus banyak dikaji kembali, karena perubahan genetik tersebut akan mengarah pada perburukan keturunan yang terbawa dari sifat genetiknya. Jadi, efek yang berakibat merugikan lebih mungkin terjadi daripada efek yang menguntungkan.

### 2.4.3. Dosis Radiasi Aman

Pengertian dosis radiasi aman bagi manusia adalah dosis maksimum yang dapat diterima oleh tubuh manusia tanpa menimbulkan pengaruh buruk terhadap

manusia. Dengan kata lain, dosis radiasi aman adalah nilai batas radiasi yang diijinkan. Adapun batas radiasi yang dimaksud dalam masalah ini adalah jika batas maksimum yang diijinkan tidak dilampaui, maka dapat dijamin bahwa pemakaian zat radioaktif tersebut tidak akan berdampak negatif, baik untuk manusia maupun lingkungan.

Ketentuan nilai batas radiasi maksimum yang diijinkan berdasarkan pada penetapan organisasi internasional yang menangani proteksi radiasi atau yang lebih dikenal dengan International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP didirikan pada tahun 1928, bersamaan dengan pertemuan internasional para ahli radiologi, International Congress of Radiology (ICR). Awalnya, perhatian utama dari ICRP adalah proteksi terhadap bahaya radiasi sinar-X yang pada saat itu tengah berkembang pesat. Tetapi, pada perkembangannya, perhatian ICRP juga meliputi proteksi terhadap bahaya lainnya. Rekomendasi yang dikeluarkan oleh ICRP pada saat ini banyak digunakan di berbagai negara sebagai acuan dalam menentukan batasan dosis dan paparan radiasi, serta ketentuan keselamatan kerja terhadap pemakaian zat radioaktif.

Untuk mengurangi kemungkinan terkena radiasi dengan dosis berlebihan, perlu diingat suatu pedoman kerja yang disingkat menjadi ALARA, kepanjangannya adalah *As Low As Reasonably Achievable*. Maksudnya adalah, bekerja dengan radiasi serendah-rendahnya yang memungkinkan untuk dilaksanakan. Dalam membahas nilai batas radiasi yang diijinkan, ada dua pengertian yang perlu diketahui, yakni pengertian batas radiasi yang diterima tubuh dan batas paparan radiasi di lingkungan.

#### 2.4.3.1. Batas Dosis Radiasi yang Diterima oleh Tubuh

Untuk mengetahui batas radiasi yang boleh diterima oleh tubuh, perlu diketahui hal-hal berikut ini, antara lain:

1. Paparan radiasi yang tidak perlu hendaknya dihindari, agar dosis radiasi yang mengenai tubuh dapat sekecil mungkin.
2. Untuk paparan radiasi yang sama, masyarakat umum yang bukan pekerja radiasi boleh menerima dosis akumulatif yang lebih kecil daripada yang diterima pekerja radiasi.



3. Dosis radiasi akumulatif yang boleh diterima oleh pekerja radiasi merupakan fungsi umur pekerja. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$D = 5(N - 18) \dots\dots\dots(2.4)$$

keterangan:

D = dosis radiasi akumulatif (Rem)

N = umur pekerja

18 = batas umur minimum untuk seseorang boleh bekerja dengan zat radioaktif

Dosis radiasi akumulatif berdasarkan persamaan tersebut bukan merupakan dosis yang dapat diterima sekaligus oleh pekerja radiasi, tetapi dosis yang boleh diterima oleh pekerja radiasi dalam jangka waktu lama dan akumulasi dari dosis yang rendah.

Nilai Batas Dosis (NBD) radiasi yang diperbolehkan umumnya mengacu pada rekomendasi yang ditetapkan oleh ICRP. Untuk di Indonesia, ketentuan dari ICRP juga dianut oleh instansi yang berwenang dalam bidang tenaga nuklir, yaitu Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Ketentuan dari BATAN pada saat ini yang mengatur masalah proteksi radiasi, termasuk tentang NBD, telah diambil alih oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), instansi independen yang berada di luar struktur organisasi BATAN. Sejak telah resmi berlakunya UU nomor 10 tahun 1997 tentang ketenaganukliran, maka tugas pelaksanaan dan pengembangan tenaga nuklir dipisahkan dari tugas pengawasan agar lebih efektif. Pengawasan semua kegiatan nuklir di Indonesia pada saat ini dilakukan oleh BAPETEN. Adapun NBD radiasi yang ditetapkan oleh ICRP dan dipakai oleh banyak negara adalah sebagai berikut:

1. Nilai batas dosis rata-rata tertinggi tahunan (NBRTT) = 5 Rem
2. Nilai batas dosis rata-rata tertinggi kwartalan (NBRTK) = 1,25 Rem
3. Nilai batas dosis rata-rata tertinggi mingguan (NBRTM) = 0,1 Rem
4. Nilai batas dosis tertinggi tahunan (NBTT) = 10 Rem
5. Nilai batas dosis tertinggi kwartalan (NBTK) = 3 Rem
6. Nilai batas dosis tertinggi mingguan (NBTM) = 0,3 Rem

Perbedaan pengertian nilai batas dosis rata-rata tertinggi dan nilai batas dosis tertinggi adalah sebagai berikut:

Misalkan ada seorang pekerja yang bekerja dengan zat radioaktif, maka dalam satu minggu orang tersebut boleh menerima paparan radiasi dengan nilai batas dosis radiasi rata-rata 0,1 Rem. Akan tetapi, kalau pekerjaan yang harus dilakukannya menyebabkan pekerja radiasi dalam satu minggu terpaksa harus menerima dosis yang melebihi dari nilai batas dosis rata-rata 0,1 Rem, maka hal itu masih diijinkan asalkan dosis radiasi yang akan diterima dalam satu minggu tersebut maksimum hanya boleh menerima dosis radiasi 1,25.

Selanjutnya, jika dosis rata-rata kuartalan terpaksa dilampaui, maka dosis tertinggi kuartalan maksimum hanya 3 Rem. Kalau nilai batas dosis tertinggi kuartalan terpaksa juga harus dilampaui, maka nilai batas radiasi rata-rata tertinggi tahunan tidak boleh melebihi 5 Rem. Pada umumnya pekerja radiasi dalam satu tahun tidak akan menerima dosis akumulatif sampai 5 Rem. Biasanya dalam satu tahun, dosis yang diterima jauh di bawah 5 Rem.

Batasan dosis yang berlapis-lapis tersebut adalah untuk mengamankan pekerja radiasi dari kemungkinan untuk menerima dosis yang berlebihan. Juga agar faktor keselamatan pekerja radiasi benar-benar ditumakan, sehingga tidak menimbulkan kerugian bagi pekerja itu sendiri.

Seandainya ada suatu pekerjaan yang menyebabkan seorang pekerja radiasi dalam satu tahun harus menerima dosis lebih dari 5 Rem, pengawas radiasi pertama-tama berkewajiban meninjau ulang prosedur kerja yang ada. Meskipun kejadian seperti ini jarang sekali terjadi, langkah-langkah penanggulangannya harus telah dipersiapkan. Dengan meninjau ulang prosedur kerja, maka dapat diperoleh suatu prosedur kerja yang baru yang merupakan perbaikan dari yang sedang ditinjau. Misalnya dengan menambah shift pekerja, sehingga kemungkinan dosis yang diterima dalam satu tahun tidak melebihi 5 Rem per pekerja. Jika memang sangat terpaksa pekerja tersebut harus bekerja dengan paparan yang menyebabkan NBRTT harus dilampaui, maka masih ada suatu cara pengamanan terakhir, yaitu NBTT yang 10 Rem tidak boleh dilampaui. Ini merupakan lapisan pengamanan terakhir.

Selain NBD yang disebutkan sebelumnya, juga terdapat NBD yang diperuntukkan bagi organ tertentu yang diijinkan secara khusus, selain kelenjar kelamin, sumsum tulang belakang, atau keseluruhan tubuh, asalkan tidak melebihi NBD yang diacu dari ketentuan ICRP. Hal tersebut ditunjukkan pada tabel 2.6 berikut:

**Tabel 2.6 :** Nilai Batas Dosis Tertinggi Untuk Organ Tubuh Tertentu. [3]

Organ Tubuh	NBTK (Rem)	NBTT (Rem)
Setiap organ tubuh, termasuk lensa mata dan kulit. (tidak termasuk kelenjar kelamin, sumsum tulang merah, kelenjar gondok)	8	10
Tulang, kelenjar gondok, lapisan kulit keseluruhan tubuh. (tidak termasuk kulit tangan, lengan, kaki, dan pergelangan kaki)	15	30
Tangan, lengan, kaki, dan pergelangan kaki.	40	75

Di Indonesia, ketentuan NBD tersebut sudah ditetapkan oleh BAPETEN seperti contoh berikut ini (dikutip sebagian dari S.K. Kepala BAPETEN Nomor.: 01/Ka. BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi).

- Pembatasan Dosis Untuk Pekerja Radiasi:

Pembatasan penugasan:

Pekerja radiasi yang berumur kurang dari 18 tahun tidak diijinkan untuk ditugaskan sebagai pekerja radiasi atau tidak diijinkan diberi tugas yang memungkinkan dia mendapat penyinaran.

Pekerja wanita dalam masa menyusui tidak diijinkan mendapat tugas yang mengandung kontaminasi radioaktif yang tinggi, jika perlu dilakukan pengecekan khusus terhadap kemungkinan kontaminasi.

Konsep Nilai Batas Dosis (NBD)

NBD yang ditetapkan dalam ketentuan ini bukan batas yang tertinggi apabila dilampaui, seseorang akan mengalami akibat merugikan yang

nyata. Meskipun demikian, karena setiap penyinaran mengandung risiko tertentu, setiap penyinaran yang tidak perlu harus dihindari dan penerimaan dosis harus diusahakan serendah-rendahnya. NBD yang ditetapkan dalam ketentuan ini dimaksudkan sebagai dasar merancang prosedur kerja, mendesain sistem proteksi yang diinginkan, untuk menentukan efisiensi tindakan proteksi dan cara kerja, serta menentukan luas dan sifat tindakan kesehatan yang perlu diberikan kepada seseorang. NBD yang ditetapkan dalam ketentuan ini adalah penerimaan dosis yang tidak boleh dilampaui oleh pekerja radiasi selama jangka waktu satu tahun, tidak tergantung laju dosis, baik dari penyinaran eksternal maupun internal, tetapi tidak termasuk dosis penyinaran medis dan penyinaran alam.

NBD untuk penyinaran seluruh tubuh :

NBD untuk pekerja radiasi yang memperoleh penyinaran seluruh tubuh ditetapkan 50 mS atau 5000 mRem per tahun.

NBD untuk wanita dalam usia subur :

Batas tertinggi penerimaan dosis pada abdomen pada pekerja radiasi wanita dalam usia subur ditetapkan tidak lebih dari 13 mS (1300 mRem) dalam jangka waktu 13 minggu dan tidak melebihi NBD untuk pekerja radiasi.

NBD untuk wanita hamil :

Segera setelah seorang pekerja wanita dinyatakan hamil, harus dilakukan pengaturan agar dalam melaksanakan tugasnya jumlah penerimaan dosis pada janin, terhitung sejak dinyatakan hamil hingga saat kelahiran, diusahakan serendah-rendahnya dan sama sekali tidak boleh melebihi 10 mSv ( 1000 mRem). Umumnya, NBD ini dicapai dengan memperkirakan mereka pada kondisi kerja yang sesuai untuk pekerja radiasi kategori B. Dalam lampiran dapat dilihat selengkapnya mengenai NBD dan ketentuan lainnya, misalnya NBD untuk penyinaran lokal, NBD untuk lensa mata, NBD untuk tangan-lengan-kaki, dan lain-lain.

Untuk masyarakat umum (bukan pekerja radiasi), seperti telah dijelaskan di muka, dosis radiasi yang boleh diterima harus lebih kecil daripada dosis radiasi yang diterima pekerja radiasi. NBD tertinggi untuk satu orang anggota masyarakat dalam jangka waktu satu tahun adalah sepersepuluh NBRTT. Kesemuanya ini untuk memberikan jaminan keselamatan terhadap pemakaian teknologi nuklir, baik keselamatan manusia maupun lingkungan.

#### *2.4.3.2. Batas Paparan Radiasi di Lingkungan*

Dewasa ini, pemakaian zat radioaktif dalam berbagai bidang kegiatan industri, kedokteran, pertanian, teknologi, dan lain-lain telah banyak dilaksanakan dan proses pengolahan bahan-bahan nuklir juga telah mulai dilaksanakan sebagai awal kegiatan industri nuklir di Indonesia. Oleh karena itu, batas paparan radiasi di lingkungan perlu diperhatikan dengan cermat. Hal seperti ini dimaksudkan agar aplikasi dan pemanfaatan teknologi nuklir tetap dapat memberikan jaminan keselamatan bagi manusia dan lingkungan, serta bermanfaat pula.

Zat radioaktif di alam dapat berupa sumber radiasi terbuka atau tertutup. Sumber radiasi yang tertutup tentunya lebih aman, karena pencemaran tidak terjadi seperti halnya sumber radiasi terbuka yang dapat mencemari lingkungan udara dan air yang dapat juga sampai ke manusia. Pencemaran radioaktif dapat sampai ke manusia dengan jalan pernapasan, jalur makanan dan minuman, atau melalui jalur luka pada tubuh manusia. Tingkat pencemaran zat radioaktif ke lingkungan bergantung pada keadaan tingkat bahaya zat radioaktif, atau yang lebih dikenal dengan tingkat radiotoksistasitas. Tingkat radiotoksistasitas ini dibagi menjadi empat kelompok, yaitu sangat tinggi, tinggi, sedang, dan rendah.

### **2.5. LIMBAH RADIOAKTIF**

Limbah radioaktif selama ini tidak pernah dibuang ke lingkungan dengan sembarangan cara, karena telah diatur dengan peraturan perundangan yang berlaku nasional dan tidak bertentangan dengan ketentuan internasional. Ketentuan yang mengatur masalah limbah radioaktif tidak lain ditujukan untuk menjamin keselamatan manusia dan lingkungan, sehingga aplikasi atau pemanfaatan

teknologi nuklir tidak menimbulkan kerugian bagi manusia dan dampak negatif lain yang tidak diharapkan.

Pengaturan masalah limbah radioaktif dan paparan radiasi secara internasional ditetapkan oleh IAEA dan International Commission on Radiological Protection (ICRP). Sedangkan secara nasional, pengaturan dan pengawasan tersebut dilakukan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Lembaga ini bersifat aktif dan independen dalam mengatur masalah pengawasan aktivitas tenaga nuklir di Indonesia. Badan ini juga mengatur dan mengawasi BATAN yang mengembangkan penelitian dan pemanfaatan teknologi nuklir di Indonesia. Tiga hal besar yang perlu diperhatikan dalam masalah radioaktif adalah pengelolaan limbah radioaktif, penyimpanan lestari limbah radioaktif dan nilai ekonomis limbah radioaktif.

### **Pengelolaan Limbah Radioaktif**

Limbah radioaktif secara umum berasal dari instalasi nuklir, seperti reaktor nuklir, baik reaktor riset, reaktor produksi isotop maupun reaktor daya pada PLTN. Pengelolaan limbah radioaktif secara garis besar terdiri dari tiga tahap pekerjaan, yaitu penampungan, pengolahan dan penyimpanan.

Penampungan merupakan tahap awal pada pengelolaan limbah radioaktif. Pada setiap tempat kerja yang melibatkan penggunaan zat radioaktif, harus disediakan wadah penampungan limbah radioaktif. Wadah tersebut dapat berupa tong tertutup yang mudah dibuka dan ditutup dengan kaki, karena kedua tangan digunakan untuk pekerjaan lain yang lebih penting. Bagian dalam wadah tersebut dilapisi dengan kantong plastik atau kertas kedap air yang kuat dan mudah diambil, sehingga dalam proses pemindahan atau pengangkutan limbah tidak menimbulkan kontaminasi terhadap lingkungan tempat kerja. Wadah semacam itu digunakan untuk menampung limbah radioaktif yang berupa padatan.

Untuk menampung limbah radioaktif yang berupa cairan dapat digunakan wadah berbentuk tangki, botol plastik atau botol gelas. Wadah tersebut harus ditempatkan di dalam ember atau baki yang sudah diberi kertas penyerap (merang). Kertas tersebut akan menyerap limbah radioaktif jika terjadi tumpahan. Penggunaan botol plastik atau botol gelas untuk wadah bergantung pada sifat

kimia limbah radioaktif tersebut. Wadah yang diberi bahan penyerap dapat digunakan untuk menampung limbah radioaktif cair yang dapat berubah menjadi limbah radioaktif padat.

Pada proses selanjutnya, setiap wadah limbah radioaktif harus diberi tanda yang jelas yang menunjukkan sifat, jenis dan aktivitas limbah radioaktif yang ditampung di dalamnya. Hal tersebut dilakukan untuk memudahkan tahap-tahap selanjutnya. Penandaan pada wadah tersebut akan lebih baik lagi jika ditambahkan dengan keterangan waktu paro, sifat fisis dan sifat kimia, seperti mudah terbakar, mudah menguap, daya korosif dan lain-lain. Apabila paparan radiasi yang dipancarkan oleh limbah radioaktif cukup tinggi, maka perlu diberi perisai penahan radiasi seperlunya untuk keselamatan radiasi nuklir. Pada Tabel 2.7 berikut diberikan penggolongan limbah radioaktif berdasarkan fasa padat, fasa cair dan fasa gas.

Selanjutnya adalah tahap pengolahan. Pengolahan limbah radioaktif ini dimaksudkan untuk mengurangi paparan radiasi dari limbah radioaktif, agar limbah tersebut dapat berkurang dampak merugikannya bagi manusia dan

**Tabel 2.7:** Penggolongan Limbah Radioaktif. [3]

<b>Fasa Padat</b>		
Golongan	Kecepatan Pemaparan (D) Pada Permukaan (R/jam)	Keterangan
1.	$D < 0,2$	Pemancar Beta dan Gamma dengan mengabaikan pemancar Alpha
2.	$0,2 < D < 2$	
3.	$D > 2$	
4.	Khusus untuk aktivitas Alpha dinyatakan dalam $Ci/m^3$	Pemancar Alpha dengan mengabaikan pemancar Beta dan Gamma
<b>Fasa Cair</b>		
Golongan	Aktivitas (A), uCi / cc	Keterangan
1.	$A < 10^{-6}$	Pada umumnya tidak diolah

2.	$10^{-6} < A < 10^{-3}$	Tanpa penahan radiasi
3.	$10^{-3} < A < 10^{-1}$	Perlu penahan radiasi
4.	$10^{-1} < A < 10^4$	Perlu penahan radiasi
<b>Fasa Gas</b>		
Golongan	Aktivitas (A), Ci / m <sup>3</sup>	Keterangan
1.	$A < 10^{-6}$	Pada umumnya tidak diolah
2.	$10^{-10} < A < 10^{-6}$	Diolah dengan filtrasi
3.	$A > 10^{-6}$	Diolah dengan cara lain

lingkungan dengan dosis paparan radiasi yang akan diterima tidak melebihi batas yang diijinkan. Jika pengurangan paparan radiasi tersebut dapat mencapai paparan radiasi alam yang sudah ada sejak terbentuknya bumi ini, maka limbah radioaktif tersebut telah dinyatakan aman.

Untuk mengurangi paparan radiasi dari limbah radioaktif tersebut, ada beberapa cara yang dapat ditempuh. Cara pengolahan tersebut antara lain:

1. Pengenceran dan Dispersi, untuk limbah radioaktif yang beraktivitas rendah.
2. Penundaan dan Peluruhan, untuk limbah radioaktif berumur paro relatif pendek.
3. Pemampatan atau Pemadatan, untuk limbah radioaktif yang beraktivitas sedang dan tinggi.
4. Pewadahan (Containment).

### **2.5.2. Penyimpanan Lestari Limbah Radioaktif**

Penyimpanan lestari limbah radioaktif sebenarnya adalah proses pembuangan limbah dengan persyaratan tertentu. Pembuangan limbah radioaktif didahului oleh proses pengelolaan limbah. Pembuangan limbah radioaktif dikatakan penyimpanan lestari atau permanen karena penyimpanan tersebut dilakukan untuk waktu yang sangat lama pada suatu tempat tertentu.

Penyimpanan lestari limbah radioaktif didahului oleh proses pengelolaan yang ketat. Persyaratan limbah radioaktif yang akan disimpan secara lestari ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain:



1. Volume limbah radioaktif sudah mencapai angka terkecil.
2. Limbah radioaktif sudah mengalami immobilization.
3. Limbah radioaktif sudah dalam pewadahan yang benar-benar rapat.

Kemudian, ada beberapa hal yang perlu diketahui berkaitan dengan rencana penyimpanan limbah radioaktif tersebut, yaitu:

1. Calon tempat penyimpanan harus bebas banjir dan terhindar dari erosi.
2. Calon tempat penyimpanan harus tahan gempa.
3. Terhindar dari kemungkinan terjadi kekritisian.
4. Tersedia sistem pemantau radiasi.
5. Tersedia sistem pendingin untuk tempat penyimpanan.
6. Tersedia penahan radiasi yang diperlukan.
7. Tersedia sistem pengamanan proteksi secara fisik.
8. Relatif jauh dari pemukiman.

### **2.5.3. Nilai Ekonomis Limbah Radioaktif**

Limbah radioaktif, meski wujudnya sudah berupa limbah, masih memiliki nilai ekonomis. Nilai ekonomis suatu limbah akan muncul apabila sudah diketahui rencana pengolahan limbah untuk memperoleh suatu manfaat baru.

Limbah radioaktif yang aktivitasnya rendah dan sedang bisa digunakan lagi sebagai sumber radiasi tertutup (sealed source) bagi keperluan pendidikan pada sekolah atau universitas. Pemakaian limbah radioaktif sebagai sumber radiasi tertutup telah melalui proses pengolahan yang ketat.

Limbah radioaktif yang masih bisa didaur ulang memiliki nilai ekonomi yang tinggi, karena dengan proses daur ulang tersebut dapat diperoleh bahan fisil baru yang dapat digunakan untuk bahan bakar baru.

Akan tetapi, belum semua negara dapat melakukan proses daur ulang limbah radioaktif tersebut. Proses daur ulang limbah radioaktif inilah yang menjadi komoditas baru yang mendatangkan devisa besar bagi negara yang telah mampu melakukannya. Beberapa negara yang sudah memiliki program proses daur ulang dapat dilihat pada Tabel 2.8. Selain itu, nilai ekonomis limbah radioaktif bisa diperoleh jika penyimpanan lestari limbah radioaktif menjadi

masalah bagi suatu negara. Negara yang menjadi tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif dari negara lain dapat membuat kontrak dengan biaya tertentu untuk penggunaan lahan di negaranya.

**Tabel 2.8:** Negara-Negara Yang Memiliki Program Daur Ulang Limbah Radioaktif. [3]

No.	Negara	Lokasi Daur Ulang (Plant)	Kap. (ton/th.)	Tahun Operasional	Keterangan
1.	Belgia	Eurochemic	60	1966	Shut down – 1974 Scheduled – 1982 Restart – 1984
2.	Brasil	Pilot Plant	3	1984	Kerjasama Jerman
3.	India	Trombay Tarapur Madras	60 100 Industri	1965 1978 -	Untuk militer. LWR, PHWR. PHWR, Thorium untuk FBR
4.	Inggris	Windscale THORP Dounreay	1500 1200 9-10	1964 1987 1978	Gas cooled reactor Oxide fuels. Mixed oxide fuels.
5.	Italia	Eurex-Saluggia Itrex-Triasia Komersial	- 4,5 1200	1969 - -	Test reactor, ox.fuels U-Th & Pu-U fuels. -
6.	Jepang	Tokai Komersial	210 1800	1977 -	Untuk Oxide fuels. Kepentingan industri
7.	Jerman	WAK- Leopoldshafen	40	1970	Reprocessing dan test facility
8.	Pakistan	Komersial	100	-	Kerjasama Perancis.
9.	Perancis	SAP-Marcoule	7,5	-	Program LMFBR

		UP-Marcoule	900	1958	Untuk militer
		PURR	100	1989	Mix oxide LMFBR
		UP2-La Hague	1000	1966	Uranium alam.
		UP3-La Hague	800	1990	Oxide fuels LWR
10.	Rusia	Klopin Radium Institute	1	1973	Experiment facility.
11.	Spanyol	-	2	-	Dalam perencanaan.

Cina adalah salah satu negara yang mengizinkan wilayahnya, di sekitar gurun Gobi, untuk menjadi tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif.

Indonesia, sebagai negara kepulauan, sebenarnya memiliki banyak pulau yang tak berpenghuni yang dapat dijadikan tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif. Tetapi, peraturan perundangan yang berlaku di Indonesia melarang untuk menerima pengiriman limbah radioaktif atau bahan beracun dan berbahaya (B3) lainnya.

## 2.6. KEAMANAN INSTALASI PLTN TERHADAP BAHAYA GEMPA

Instalasi nuklir didesain sehingga gempa-gempa dan kejadian eksternal lainnya tidak akan membahayakan terhadap keamanan reactor. Misalnya di Perancis, reactor nuklir didesain untuk menahan gempa sekuat gempa 100 tahunan. Diasumsi bahwa 20% reactor nuklir di dunia beroperasi dengan aktivitas seismic yang signifikan.

Karena frekuensi dan magnitudo gempa di negara Jepang, maka perhatian khusus diberikan terutama saat penentuan lokasi, desain dan konstruksi suatu reactor pembangkit nuklir. Perencanaan gempa dari reactor tersebut berdasar pada kriteria lebih ketat daripada yang digunakan untuk pembangkit non-nuklir. Reactor dibangun di atas tanah berbatu keras (bukan lapisan sediment) untuk meminimalkan goncangan gempa. Pembangkit tenaga nuklir didesain sehingga tahan menahan 2 spesifikasi intensitas gempa S1 dan S2. Reactor dilengkapi dengan detektor getaran. Bila kekuatan tanah mencapai besaran yang ditentukan

(S1), system reactor diaktifkan untuk secara otomatis reaktor mati mendadak secara aman.

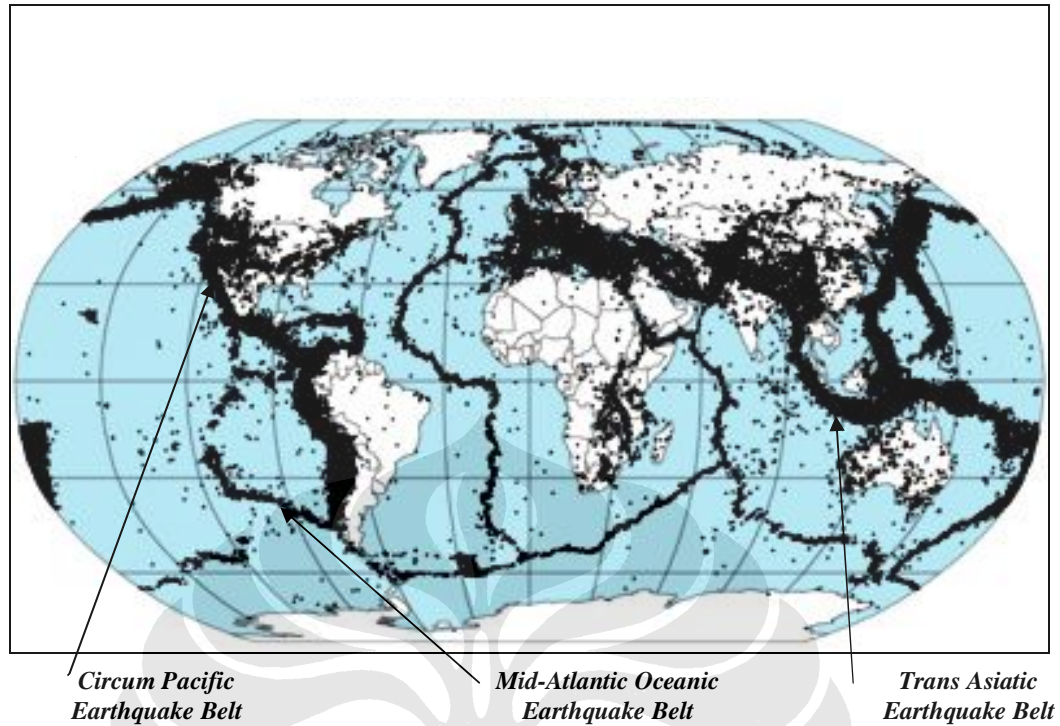
Gerakan tanah atau nilai puncak percepatan tanah (S1) untuk dasar desain reactor didefinisikan sebagai gempa terbesar yang mungkin terjadi di lokasi reactor nuklir, berdasar pada seismisitas area tersebut. Reaktor nuklir dapat terus berfungsi pada gempa tingkat S1, walaupun dalam praktek diharapkan pada level yang lebih rendah. Jika reaktor mati, maka akan hidup kembali setelah S1 berhenti.

Gerakan tanah yang lebih besar pada suatu area, mengantisipasi struktur tektonik dan faktor-faktor lain yang harus diperhitungkan, walau propabilitasnya sangat rendah. Getaran terbesar yang dapat diramalkan adalah batas atas gempa dasar desain S2, umumnya mengasumsikan gempa dengan magnitude 6.5 langsung dibawah reactor. Sistem pengamanan reactor akan efektif selama gempa S2 dengan mati mendadak secara aman tanpa melepaskan radioaktif dan pemeriksaan ekstensif harus dilakukan sebelum dinyalakan kembali.

Efektifitas sistem "mati mendadak secara aman" telah mengamankan beberapa reaktor seperti pada :

- Pada tahun 1995, pembangkit tenaga nuklir yang berjarak 110 km sebelah utara Kobe, tidak dipengaruhi oleh gempa dahsyat di Kobe-Osaka, namun pada tahun 2004, 2005 dan 2007 reaktor-reaktor di Jepang mati secara otomatis akibat percepatan tanah yang melebihi nilai yang ditentukan.
- Pada 1999, tiga reaktor nuklir di Taiwan mati secara otomatis selama gempa, dan dihidupkan kembali dua hari kemudian.

Hubungannya dengan instalasi nuklir untuk pembangkit tenaga listrik, PLTN, adalah tantangan bagi para ahli untuk dapat membangun PLTN di berbagai tempat di dunia, sementara telah diketahui oleh dunia luas bahwa bumi tersusun dari lempengan-lempengan yang setiap detik dapat bergeser. Keuntungannya, beberapa negara di dunia yang tidak dilalui oleh pertemuan antara dua lempengan atau lebih. Tetapi justru ada sebuah negara maju yang telah lama menggunakan teknologi nuklir sebagai pemasok kebutuhan listriknya membangun banyak PLTN di negaranya yang dilalui garis pertemuan lempengan bumi (Gambar 2.17).



**Gambar 2.17** : Peta Sabuk Lempeng Tektonik Bumi

Pada Gambar tersebut diberikan tersebut terlihat sabuk-sabuk lempeng tektonik bumi. Sabuk-sabuk tersebut secara aktif bergerak setiap saat untuk mencari kondisi stabilnya. Jika pergerakan tersebut terjadi di bawah lautan, maka yang kemungkinan terjadi adalah gelombang tsunami, sedangkan jika hal tersebut terjadi di bawah permukaan daratan yang banyak manusia tinggal di atasnya, termasuk PLTN, maka akan membawa kerusakan besar. Khusus untuk PLTN, sebaiknya dibangun tidak di atas sabuk-sabuk tersebut atau harus memiliki sistem bahaya gempa yang baik.