

BAB I

PENGANTAR FISIKA NUKLIR: REAKSI NUKLIR DAN REAKSI BERANTAI

Materi; Benda padat, cair dan gas; Atom dan molekul

Materi di sekeliling kita, udara, cairan dan benda-benda padat, terdiri atas rangkaian molekul-molekul. Molekul itu sendiri terdiri atas gabungan atom-atom, bentuk terkecil materi. Udara terdiri atas molekul-molekul gas, terutama nitrogen, oksigen dan dioksida karbon. Gas-gas lainnya pun ada tetapi dalam kadar yang kecil.

Keseluruhan materi terdiri atas unsur-unsur: nitrogen adalah unsur, demikian juga oksigen. Setiap unsur memiliki perilaku kimiawi yang sama. Gas-gas seperti nitrogen (N) dan oksigen (O) terdiri atas molekul yang masing-masing mengandung dua atom nitrogen (lambang kimianya N_2) atau oksigen (lambang O_2)¹. Molekul dioksida karbon terdiri atas satu atom unsur karbon (arang atau C) dan dua atom oksigen (O) dengan lambang molekul CO_2 . Molekul gas senantiasa dapat bergerak bebas, tetapi juga saling berbenturan dan terkungkung di dalam ruangan yang terbatas. Di udara sekeliling kita, misalnya, kita merasakan “tekanan udara” sebagai akibat benturan molekul-molekul udara. Di alam bebas molekul gas terkena gaya gravitasi sehingga tidak bisa lepas dari permukaan bumi. Semakin tinggi dari permukaan bumi, semakin kecil tekanan udara.

Cairan juga terdiri atas molekul-molekul yang senantiasa dalam keadaan bergerak atau bergetar. Bedanya dengan gas: molekul cairan seolah-olah melekat satu sama lain karena ada gaya tarik jangka pendek di antara mereka. Gaya tarik ini cukup kuat sehingga molekul cairan seakan-akan melekat dan tidak memungkinkan mereka terbang bebas ke udara (ke atas), kecuali kalau mereka memiliki energi kinetik yang tinggi (sehingga terasa “panas”), seperti uap misalnya. Tetapi gaya tarik ini cukup lemah sehingga molekul dapat bergulir di antara mereka, dan ini memungkinkan cairan untuk mengalir andaikata ada gaya gravitasi yang menarik mereka ke bawah.

Benda padat terdiri atas molekul atau atom yang terikat satu sama lain dengan ikatan yang cukup kuat sehingga mereka tidak bisa dengan mudah berpindah tempat. Jenis ikatannya bermacam-macam. Logam lazimnya adalah campuran berbagai unsur logam dan bentuk ikatannya seperti kristal: atom-atom tersusun secara teratur dalam suatu butiran (ketika cair); butiran-butiran ini membeku bila suhu sudah turun dan menyatu satu dengan yang lain. Besi murni terdiri atas atom-atom besi (lambang Fe), yang di tempatnya masing-masing bergetar dengan tingkat getaran yang bergantung pada nilai suhu. Kayu terdiri atas

¹ Angka 2 berarti ada dua atom di dalam molekul nitrogen N atau oksigen O.

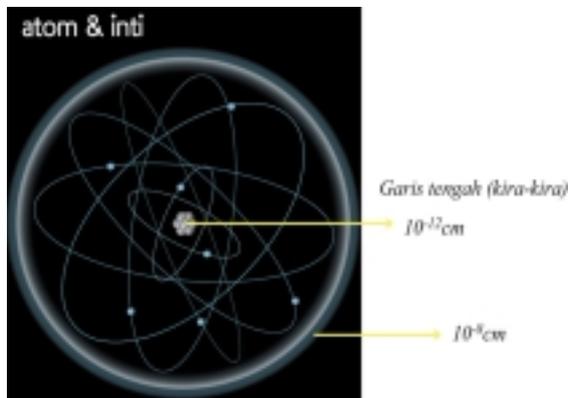
rangkainan molekul yang sangat panjang dengan atom-atom campuran dari karbon, hidrogen dan oksigen. Ketiga unsur ini adalah komponen utama benda hidup: karena itu disebut bahan organik.

Unsur; Nomor Atom dan Teori Atom

Semua unsur memiliki nomor yang bersifat unik, disebut nomor atom dan ditandai dengan lambang Z. Unsur hidrogen (${}_1\text{H}$) adalah nomor 1, helium (${}_2\text{He}$) nomor 2, litium (${}_3\text{Li}$) nomor 3, karbon nomor 6, nitrogen nomor 7, oksigen nomor 8. Nomor atom Z lazimnya diletakkan di sebelah kiri bawah lambang unsur. Sifat kimiawi masing-masing juga unik, walaupun di antara mereka ada yang memiliki sifat-sifat yang serupa, misalnya Li dengan natrium. Natrium (Na) memiliki nomor atom 11 dan klor (Cl) nomor atom 17. Molekul klorida natrium (NaCl), kita sebut sehari-hari “garam”, memiliki sifat kimiawi yang sangat berbeda dengan natrium ataupun klor (masing-masing harus kita perlakukan dengan hati-hati). Nomor atom Fe adalah 26, sedang timah putih (Sn) adalah 50, tembaga (Cu) adalah 29 dan mangan (Mn) adalah 25. Emas (Au) bernomor atom 79, tetapi perak (Ag) 47. Perunggu bukan unsur melainkan campuran logam: ia terdiri dari campuran tembaga dan seng (Zn) yang bernomor atom 30. Di antara logam berat selain emas juga ada timah hitam (Pb) dengan nomor atom 82 dan uranium (U) dengan nomor atom 92. Uranium adalah unsur bernomor atom tertinggi yang terdapat dalam alam. Plutonium (Pu) bernomor atom 93; ia tidak terdapat dalam alam: ia adalah unsur buatan.

Setiap atom terdiri dari satu inti, di mana terdapat hampir keseluruhan massa atom, dan satu atau beberapa atau banyak elektron yang mengitari inti. Dalam satu atom yang secara listrik netral terdapat sejumlah elektron yang sama dengan nomor atomnya. Apabila elektron melebihi nomor atomnya maka ia disebut ion negatif, tidak netral secara listrik. Apabila jumlah elektronnya kurang dari nomor atomnya maka ia disebut ion positif.

Walaupun hampir seluruh massa atom ada di dalam inti atom, volume inti atom sangat kecil ketimbang volume atom. Jadi volume atom sebenarnya ruang hampa belaka, karena volume inti sangat kecil, demikian juga volume elektron. Besarnya atom ditentukan oleh peredaran elektron mengelilingi inti, sehingga walaupun volume dan massanya kecil namun elektron seakan menguasai ruang atom.. Selain itu inti atom bermuatan listrik positif yang besarnya sama dengan muatan listrik seluruh elektron yang mengitarinya adalah inti dari atom yang secara listrik netral. Volume atom tak dapat dilingkupi oleh atom lain karena ada gerakan elektron.



Gambar 1. Atom dengan intinya, dengan ukuran garis-tengah atom dan inti.

Inti Atom; Proton dan Neutron; Massa Atom

Inti atom terdiri atas dua komponen utama berupa zarah: proton bermuatan positif (sama besar tetapi berlawanan tanda dengan muatan zarah elektron yang negatif) dan zarah neutron yang tidak bermuatan listrik². Massa proton hampir sama besar dengan massa neutron masing-masing dibulatkan sebesar satu satuan massa atom (sma). Secara akuratnya massa proton adalah $1,6726 \times 10^{-24}$ gram setara 938,2723 MeV, dan massa neutron adalah $1,649 \times 10^{-24}$ gram setara 939,5656 MeV. Massa inti atom hidrogen terdiri atas satu butir proton dan hal ini sering diacu bermassa 1 sma. Massa atom diukur dalam satuan massa atom atau sma: satu sma adalah $1,6 \times 10^{-24}$ gram.

Inti atom helium terdiri atas 2 butir proton dan 2 butir neutron sehingga nomor massanya 4 dan bermassa 4 sma. Nomor massa ditandai dengan lambang A. Sesuatu unsur semua atomnya memiliki inti dengan jumlah proton yang sama, yaitu jumlah proton sama dengan Z nomor atomnya. Tetapi ada kemungkinan suatu unsur memiliki atom-atom yang intinya mempunyai jumlah neutron yang berbeda. Jenis-jenis atom yang jumlah neutronnya beda tetapi memiliki jumlah proton atau nomor atom yang sama (karena satu unsur) disebut isotop dari unsur tersebut. Kata isotop berarti sama (iso) tempat (topos), yakni tempat yang sama di dalam daftar unsur. Isotop-isotop dari sesuatu unsur memiliki nomor atom Z yang sama tetapi nomor massa A yang berbeda. Sebagai contoh oksigen dan belerang (lambang S) memiliki beberapa isotop masing-masing. Oksigen memiliki tiga isotop stabil yang terdapat dalam alam, yaitu sebagian terbesar (99,76%) O^{16} (untuk atom/isotop oksigen dengan 8 proton dan 8 neutron), O^{18} (untuk atom/isotop oksigen dengan 8 proton dan 10 neutron) dan O^{17} (dengan 9 neutron)³.

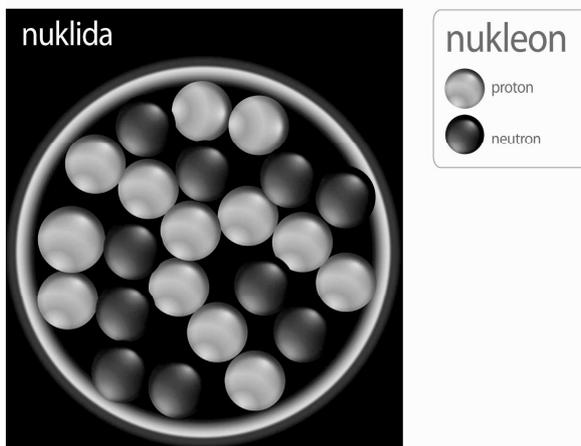
² Muatan listrik proton dan elektron sama besar, masing-masing $1,6 \times 10^{-12}$ Coulomb tetapi berlawanan tanda.

³ Nomor massa A ditempatkan di sebelah kanan atas lambang kimia.

Demikian juga belerang memiliki empat isotop stabil yang terdapat dalam alam, yaitu S^{32} yang terbanyak (95%), dan S^{34} sebanyak 4,2%, serta yang lainnya S^{33} dan S^{36} . Semakin tinggi nomor atom atau nomor massa atom, umumnya semakin banyak isotop yang dimiliki unsur. Maka dari itu contoh-contoh lain adalah timbal atau timah hitam Pb dengan empat isotop/nuklida stabil dengan nomor massa 204, 206, 207, dan 208⁴. Namun ia memiliki 42 isotop yang tidak stabil dengan nomor massa bervariasi dari 181 hingga 215. Uranium (U) juga memiliki cukup banyak isotop: ada 25 dan semuanya radioaktif. Namun waktu paroh dari tiga di antaranya sedemikian panjang (sebanding dengan usia bumi) maka ketiga isotop tersebut terdapat dalam alam, yaitu dengan nomor massa 234 (hanya 0,0055%), 235 (sebanyak 0,72%), dan 238 (terbanyak dengan 99,2745%).

Nukleon dan Nuklida

Ada lagi istilah lain untuk menyebut proton atau neutron, yaitu nukleon atau zarah inti. Jadi berbagai isotop dari sesuatu unsur itu semuanya memiliki jumlah proton yang sama dalam intinya, yaitu sama dengan nomor atom unsur itu, akan tetapi intinya memiliki jumlah nukleon yang berbeda. Secara umum, suatu inti dengan jumlah Z proton dan $(A-Z)$ neutron disebut suatu nuklida. Jadi suatu unsur yang memiliki beberapa isotop berarti unsur tersebut intinya terdiri dari beberapa nuklida yang semuanya memiliki jumlah proton yang sama tetapi berbeda jumlah neutron (dan juga jumlah nukleon). Jumlah nukleon sama dengan nomor massa A .



Gambar 2. Inti atom disebut nuklida terdiri atas sejumlah A nukleon, yaitu proton dan neutron. Jumlah proton sebanyak Z , sama dengan nomor atom yang menentukan jati-diri atau unsurnya. Jumlah neutron adalah $N = A - Z$.

⁴ Sebenarnya ${}_{82}\text{Pb}^{204}$ tidak stabil, tetapi terdapat dalam alam karena waktu parohnya sangat panjang.

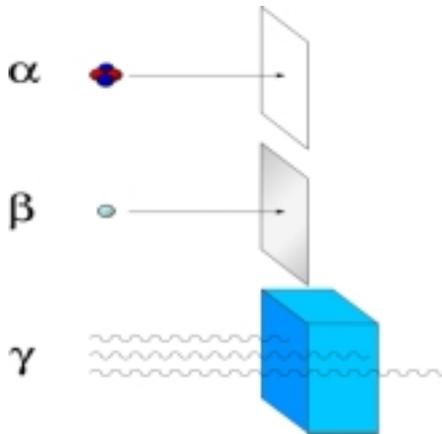
Radioaktivitas; Sinar Alfa, Beta dan Gamma

U adalah unsur yang radioaktif, yaitu dapat berubah menjadi unsur atau isotop lain dengan memancarkan salah satu atau beberapa sinar yang disebut sinar alfa, sinar beta dan sinar gamma. U yang terdapat dalam alam terdiri terutama atas dua isotop, keduanya radioaktif, yaitu U^{238} dan U^{235} . Angka menunjukkan jumlah nukleon yang ada di dalam inti atom. Kedua isotop U memiliki 92 proton dalam intinya; inti atom U^{238} memiliki 146 neutron dan U^{235} memiliki 143 neutron.

Sinar alfa sesungguhnya adalah pancaran zarah berupa inti atom helium yang terdiri atas empat butir nukleon: dua butir proton dan dua butir neutron bergabung menjadi satu. Struktur zarah alfa ini sangat stabil dan pekat, dalam arti sukar untuk diuraikan. Ternyata struktur inti dengan jumlah proton atau neutron yang jumlahnya genap merupakan struktur inti yang lebih stabil ketimbang yang jumlah nukleonnya ganjil.

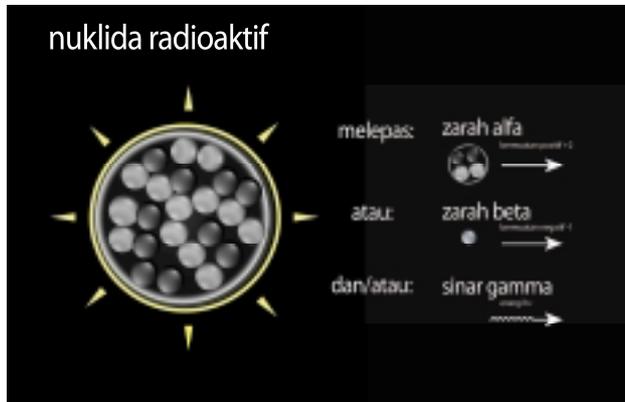
Apabila inti atom uranium (U^{238}) mengeluarkan zarah alfa, yang tersisa tentunya bukan uranium lagi karena jumlah protonnya berkurang dua. Berarti nomor atomnya berubah menjadi 90, menjadi inti atom torium, yang juga tidak stabil atau radioaktif. Massa atomnya berkurang empat sma (dua proton dan dua neutron) menjadi 234 atau Th^{234} . Dengan mengeluarkan zarah alfa atau beta dari inti atom, maka atom tersebut berubah menjadi atom unsur lain: kalau yang dikeluarkan zarah beta jumlah nukleon inti atom tersebut tidak berubah, yang berarti nomor massanya tetap, tetapi nomor atomnya berubah menjadi tambah satu. Dari semula (Z) menjadi ($Z+1$), karena satu muatan negatif telah keluar atau dikeluarkan. Suatu inti atom yang radioaktif akan mengeluarkan zarah alfa atau beta, dan hal ini akan terus terjadi sampai tercapainya inti atom yang stabil. Inilah yang akan terjadi pada inti atom uranium, dan bentuk atau inti akhir adalah inti Pb. Dalam alam terdapat empat deret radioaktivitas yang awalnya adalah uranium atau thorium. Hampir semuanya berakhir dengan atom Pb yang stabil. Keempat deret radioaktivitas tersebut adalah: deret thorium, deret radium (atau uranium), deret aktinium, dan deret neptunium.

Deret thorium diawali dengan Th^{232} dan berakhir dengan Pb^{208} . Deret radium (atau uranium) dimulai dengan U^{238} dan berakhir dengan Pb^{206} . Deret aktinium berawal dari U^{235} (atau Pu^{239}) dan berakhir dengan Pb^{207} . Dan deret neptunium mulai dengan Np^{237} (atau Pu^{241} dan Am^{241}) dan berakhir dengan Bi^{209} (ternyata kemudian menjadi Tl^{205} , yang benar-benar stabil).



Gambar 3. Sifat-sifat pancaran dari nuklida radioaktif, yang dapat melepas sinar alfa, beta dan/atau gamma. Sinar alfa dengan dua muatan listrik positif dan massa yang besar sangat mudah berinteraksi dengan materi dan dapat dihentikan oleh sehelai kertas. Zarah beta dengan massa yang kecil dan bermuatan satu negatif dapat lebih mudah “menyelinap” di antara molekul materi dan memiliki daya tembus lebih tinggi ketimbang zarah alfa. Zarah beta dapat dihentikan oleh sekeping logam. Sinar gamma selaku gelombang elektromagnetik memiliki daya tembus yang jauh lebih besar ketimbang zarah beta, namun perisai yang tebal dapat menghentikannya, terutama bahan yang memiliki nomor atom besar (dan karenanya banyak elektronnya).

Ketiga jenis “sinar” di atas berasal dari nuklida yang radioaktif, yaitu nuklida yang semula dalam keadaan tidak stabil karena energi berlebih, kemudian nuklida tersebut menuju keadaan yang lebih stabil dengan memancarkan “sinar” alfa atau beta yang dapat disusul dengan sinar gamma. Secara skema dapat dilukiskan seperti di bawah ini.



Gambar 4 Nuklida yang tidak stabil (yang energinya berlebih) menjadi radioaktif, yaitu memancarkan “sinar” alfa atau beta, yang sesungguhnya zarah, dan dapat disusul dengan pancaran sinar gamma (gelombang elektromagnet).

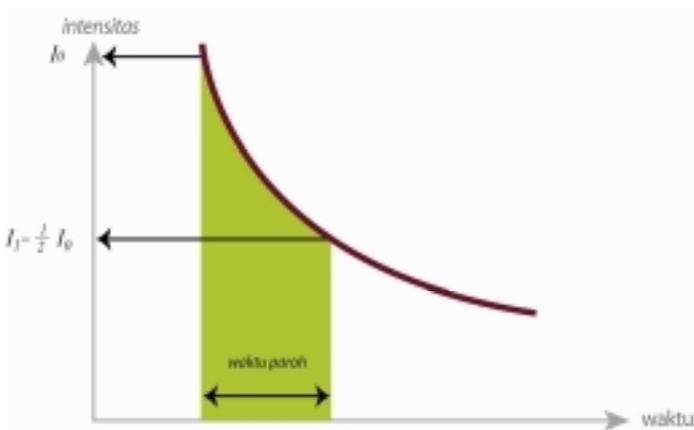
Apabila sinar alfa terdiri atas empat butir nukleon (dua proton dan dua neutron), sinar beta adalah pancaran terdiri atas elektron, tetapi berasal dari inti atom yang tidak stabil bukan dari kulit atom. Dengan demikian sinar beta adalah pancaran yang bermuatan listrik negatif dan massanya sangat kecil ketimbang nukleon.

Sinar gamma adalah pancaran gelombang elektromagnet, juga dikeluarkan dari inti atom yang tidak stabil, yang sifat-sifat fisiknya serupa sinar-X, tetapi umumnya memiliki panjang gelombang yang lebih pendek.

Reaksi Nuklir; Radioaktivitas dan Waktu Paroh

Reaksi nuklir adalah gejala di mana terjadi perubahan terhadap inti atom. Radioaktivitas adalah semacam reaksi nuklir yang terjadi secara spontan sebagai akibat dari keadaan di mana inti atom semula dalam keadaan kurang stabil dan mengeluarkan zarah dan/atau gelombang elektromagnet supaya ia mencapai keadaan yang lebih stabil. Apabila suatu inti atom yang stabil secara tiba-tiba mendapatkan tambahan energi dari luar ia berubah menjadi kurang stabil dan dapat timbul reaksi nuklir. Misalnya inti atom yang kebetulan menangkap photon (gelombang elektromagnetik) atau zarah berenergi tinggi yang berasal dari luar bumi, yaitu sinar kosmik, maka ia menjadi tidak stabil dan dapat memancarkan nukleon dari inti atom. Inilah yang terjadi terhadap inti atom nitrogen ${}^7\text{N}^{14}$ yang

banyak terdapat di udara⁵: ia menangkap energi sinar kosmik dan salah satu protonnya berubah menjadi neutron sehingga nomor atomnya berubah dari 7 menjadi 6, yaitu karbon atau arang dan nomor massanya tetap 14. Nuklida ${}^6\text{C}^{14}$ ini cukup stabil dan memiliki waktu paroh 5730 tahun. Setelah bumi kita dibom oleh sinar kosmik selama berjuta bahkan bermilyar tahun, maka dapatlah dikatakan bahwa di dalam udara terdapat sejumlah nuklida ${}^6\text{C}^{14}$ yang jumlahnya sudah mantap. Waktu paroh 5730 tahun berarti bahwa dalam jangka waktu tersebut jumlah yang ada sekarang, saat ini, akan tinggal separohnya⁶.



Gambar 5. Peluruhan radioaktivitas menurut waktu; waktu paroh.

Prinsip inilah yang digunakan dalam metode penanggalan karbon. Fosil atau benda yang tertanam di dalam bumi mengandung unsur karbon, termasuk karbon radioaktif ${}^6\text{C}^{14}$, yang tak bertambah lagi; bahkan nuklida karbon berkurang karena proses alamiah peluruhan ${}^6\text{C}^{14}$. Bila setelah digali dan kadar ${}^6\text{C}^{14}$ yang tersisa diukur, maka dapat diperkirakan berapa lama fosil atau benda tersebut telah tertanam⁷.

Reaksi nuklir dapat terjadi juga apabila inti atom menjadi sasaran percobaan ilmuwan yang mengarahkan zarah bermuatan dengan bantuan alat pemercepat: inti atom dapat menangkap zarah tersebut dan mendapatkan tambahan energi sehingga menjadi kurang stabil dan mengalami reaksi nuklir. Alat pemercepat dapat dibuat untuk memperoleh pancaran zarah elektron, proton atau sinar alfa (inti atom helium). Pancaran proton atau sinar alfa dapat menimbulkan reaksi nuklir pada

⁵ Seperti diketahui udara di bumi kita terdiri atas 78% N_2 , 21% O_2 , 0,96% argon (gas mulia), dan 0,04% adalah CO_2 , helium, air dan lain-lain.

⁶ Dalam kenyataannya, selama sekian tahun tentunya akan ada lagi tambahan nuklida tersebut dari hasil reaksi antara sinar kosmik dengan udara, sehingga jumlah nuklida mencapai tingkat yang mapan tadi.

⁷ Diasumsikan bahwa kadar ${}^6\text{C}^{14}$ ketika fosil atau benda ditanam sama dengan kadar di udara saat ini.

atom bernilai Z rendah (dapat pula pada atom bernilai Z tinggi asal pancarannya memiliki energi yang cukup tinggi). Satu contoh reaksi nuklir demikian adalah reaksi nuklir berikut :



Gambar 6. Reaksi nuklir penangkapan zarah alfa oleh nuklida nitrogen-14, untuk sesaat menjadi nuklida gabungan fluor-18, kemudian memancarkan proton dan berubah menjadi nuklida oksigen-17.

Yaitu zarah alfa (dari zat radioaktif radium) diarahkan ke nuklida nitrogen, yang berubah menjadi oksigen sambil satu butir proton dilepas. Yang tertinggal adalah nuklida oksigen bermassa 17 sma. Oksigen-17 terdapat dalam alam dengan kadar hanya 0,038 persen. Percobaan ini dilakukan oleh Rutherford dan merupakan pengubahan unsur (dari nitrogen menjadi oksigen) yang untuk pertama kali dibuat manusia. Karena inilah Rutherford memperoleh Hadiah Nobel Bidang Kimia, walaupun ia seorang ilmuwan fisika.

Struktur Atom; Sifat Zarah dan Gelombang pada Skala Sub-Atomik

Percobaan terkenal lainnya yang dilakukan oleh Rutherford adalah mengarahkan zarah alfa dari zat radioaktif radium ke sehelai lembaran emas. Inilah yang digunakan dalam percobaan Rutherford tahun 1912 ketika membuktikan bahwa struktur atom terdiri atas suatu inti, yang amat kecil ketimbang volume atom, di mana terpusat seluruh muatan listrik positif dan nyaris seluruh massanya, dan sejumlah elektron yang mengitarinya. Ternyata ada sebagian kecil zarah alfa yang berbalik dipantulkan oleh emas, dan hal ini hanya dapat dijelaskan apabila seluruh muatan listrik positif emas terpusat di dalam suatu inti.. Berbalikny arah zarah alfa hanya dimungkinkan dengan gaya tolak-menolak elektromagnet antara inti emas ($Z = 79$) dan zarah alfa ($Z = 2$); apabila muatan listrik positif atom emas yang sebanyak +79 itu tersebar dalam volume atom maka mustahil terjadi gaya tolak menolak yang mampu membalikkan arah zarah alfa.

Sebelumnya, atom diperkirakan benda kecil yang bulat terdiri atas semacam gumpalan gas bermuatan positif dengan butir-butir elektron tersebar di dalamnya.

Pergerakan elektron ketika itu belum diketahui. Bahkan baru setelah beberapa tahun dapat diperkirakan bagaimana gerakan zarah dan gelombang elektromagnetik pada skala sub-atomik. Ternyata harus dipostulasikan bahwa gerakan zarah memiliki sifat-sifat seperti gerakan gelombang, dan sebaliknya gerakan gelombang elektromagnetik memiliki sifat-sifat seperti gerakan zarah⁸. Teori atom Bohr menggunakan mekanika kuantum untuk menjelaskan adanya garis-edar elektron mengitari inti atom dan adanya perpindahan garis-edar elektron inilah yang menjelaskan terjadinya penyerapan atau penglepasan energi atom⁹.

Sifat ganda yang dimiliki zarah maupun gelombang elektromagnet terbukti dari beberapa percobaan yang dilakukan oleh para ilmuwan. Percobaan dengan mengarahkan pancaran sinar-X terhadap kristal, misalnya, menimbulkan gejala yang disebut difraksi terhadap sinar-X. Yaitu munculnya pola beraturan yang melukiskan struktur atom di dalam kristal. Ternyata bahwa pancaran sinar elektron pun dapat menimbulkan pola difraksi yang serupa, kalau tidak dapat dikatakan sama. Hal ini tentunya hanya dapat dijelaskan dengan menyatakan bahwa gerakan elektron tersebut memiliki sifat gelombang.

Sebaliknya, gelombang elektromagnet pun memiliki sifat seperti gerakan zarah. Hal ini terbukti dengan gejala yang disebut efek fotolistrik: yaitu gelombang elektromagnet seakan ditangkap oleh atom dan berakibat terpentalnya sebutir elektron dari atom tersebut. Ternyata hal ini dapat dijelaskan dengan mengatakan bahwa gelombang elektromagnet dengan frekwensi ν memiliki energi sebesar $h\nu$, ibarat gelombang tersebut terdiri dari butir-butir energi sebesar $h\nu$ dan diberi nama “foton”.

$$\text{Energi foton } E = h\nu$$

Karena menurut Einstein energi adalah “massa” dikalikan c^2 , dan menurut konvensi momentum adalah “massa” dikalikan kecepatan, dalam hal ini “ c ”, maka momentum foton adalah : “massa” $\times c = [(h\nu)/c^2] \times c = (h\nu)/c$.

Mengenai zarah sub-atomik yang juga memiliki sifat ganda, terbukti dengan dapat diterapkannya rumus yang mengaitkan momentum zarah dengan panjang gelombangnya, yaitu rumus de Broglie : $\lambda = h / p$.

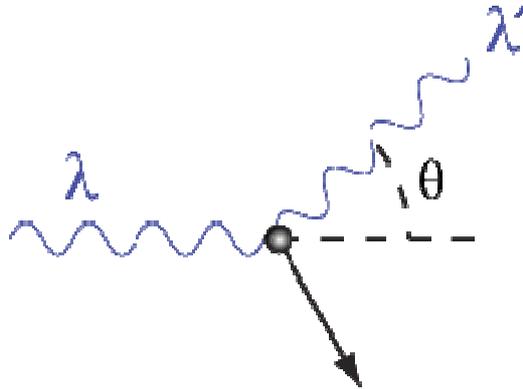
Efek fotolistrik, di mana cahaya yang menyinari logam dapat menimbulkan arus listrik, dapat dijelaskan dengan gagasan Einstein yang menyebutkan cahaya dapat dianggap seperti zarah dengan nama foton. Energi dari foton ini yang diserahkan kepada elektron sehingga melepaskan dirinya dari permukaan logam.

Lebih jauh mengenai sifat zarah yang dimiliki gelombang elektromagnet adalah penjelasan tentang efek Compton atau hamburan Compton. Yaitu gelombang elektromagnet yang mengalami penurunan energi atau perpanjangan

⁸ Gerakan gelombang dan gerakan zarah ini tentunya diartikan sesuai pengalaman kita sehari-hari mengenai gelombang dan zarah. Pada skala sub-atomik pengalaman kita ini tidak berlaku.

⁹ Jadi dalam skala sub-atomik “gerakan” elektron di dalam suatu garis-edar adalah suatu keadaan di mana sistem atom dalam keadaan stabil. Menurut ilmu elektromagnet konvensional, elektron yang berputar mengelilingi inti semestinya memancarkan energi karena mengalami percepatan.

gelombang setelah menerjang elektron keluar dari orbit dalam atom. Efek Compton dijelaskan seolah benturan yang terjadi adalah antar zarah dengan memakai hukum konservasi momentum dan konservasi energi.



Gambar 7. Efek Compton atau hamburan Compton antara foton dan elektron.

Lebih jauh tentang pergerakan dalam skala sub-atomik

Pergerakan zarah dan gelombang pada skala sub-atomik dilukiskan dengan bantuan ilmu mekanika kuantum. Salah satu prinsip dalam mekanika kuantum ialah apa yang dinamai Prinsip Ketidak-tentuan/Ketak-pastian Heisenberg, yang menyatakan bahwa gerakan suatu zarah dalam skala sub-atomik ini mengikuti ketentuan bahwa ketidak-pastian posisi dikalikan ketidakpastian momentum paling sedikit adalah sebesar $h/4\pi$, atau

$$\Delta x * \Delta p > h/4\pi$$

di mana h adalah konstanta Planck. Hal tersebut adalah hukum alam, dan bukannya menggambarkan keterbatasan kemampuan manusia dalam menciptakan alat pengukuran posisi x ataupun momentum p . Dengan alat yang sempurna pun manusia tidak dapat melanggar prinsip ketakpastian ini.

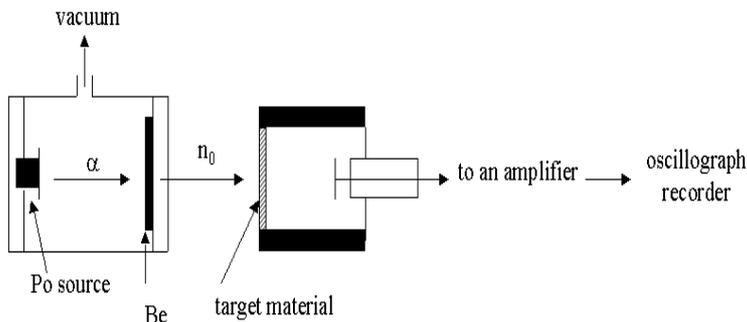
Prinsip lain dalam mekanika kuantum adalah Prinsip eksklusi Pauli, yang menyatakan bahwa zarah seperti elektron, proton dan neutron (yaitu yang tergolong fermion) tidak dapat memiliki suatu set (terdiri atas empat angka atau bilangan) angka atau bilangan kuantum yang sama. Dua elektron dalam suatu atom, misalnya atom helium, bisa memiliki tiga set angka atau bilangan kuantum yang sama: $n=1$, $l=1$, dan $m=1$, tetapi angka $s=1/2$ mereka harus berbeda: yang satu positif yang lainnya negatif. Dalam kata lain dua butir elektron tidak boleh menempati satu keadaan yang digambarkan oleh satu set angka atau bilangan kuantum.

Dalam suatu atom bilangan n adalah bilangan kulit, l adalah bilangan orbit atau lintasan, m adalah bilangan magnetik, dan s adalah bilangan spin.

Suatu keadaan yang dinyatakan dengan suatu set bilangan kuantum adalah suatu keadaan atau aras energi. Suatu keadaan atau aras energi ini bisa sewaktu-waktu berubah yang disebabkan oleh penyerapan energi atau penglepasan energi oleh atom. Perubahan aras atau keadaan energi dapat timbul sebagai akibat benturan dengan atom atau zarah lain atau sebagai akibat tertangkapnya foton (gelombang elektromagnet). Proses penyerapan atau penglepasan ini hanya dapat berlangsung secara kuantum: artinya hanya dapat terjadi bilamana energi foton atau energi benturan itu sama besar dengan selisih aras energi yang dimiliki oleh atom yang bersangkutan. Apabila tidak sama besar maka proses penyerapan atau penglepasan tidak terjadi.

Penemuan Neutron, Struktur Inti dan Angka Ajaib

Chadwick dalam tahun 1932 menemukan zarah neutron. Chadwick membaca laporan percobaan Irene Joliot-Curie dan suaminya Frederic Joliot yang menggunakan polonium sebagai sumber sinar alfa yang diarahkan untuk bereaksi dengan berilium. Radiasi yang keluar dinyatakan sinar gamma energi tinggi karena sanggup mengeluarkan proton dari parafin. Chadwick mengulang percobaannya dengan memakai beberapa bahan sebagai sasaran radiasi yang keluar dari berilium: selain parafin digunakan pula helium, nitrogen dan lainnya. Dari pengukuran energi zarah-zarah yang ditumbuk oleh radiasi kuat dari berilium, Chadwick membuktikan bahwa hasilnya hanya dapat diterangkan dengan menyatakan bahwa radiasi dari berilium itu tak lain adalah zarah neutral dengan massa sama dengan proton, dan diberinya nama neutron. Untuk karyanya ini Chadwick memperoleh hadiah Nobel bidang fisika tahun 1932. Berikut ini bagan peralatan yang digunakan oleh Chadwick.



Gambar 8. Peralatan yang digunakan oleh Chadwick ketika membuktikan adanya zarah neutron yang keluar dari berilium.

Penemuan neutron ini membuat pengetahuan atom menjadi seperti diuraikan di atas: inti atom terdiri atas sejumlah A nukleon, dengan Z proton dan $(A-Z)$ neutron. Atom yang neutral memiliki Z elektron yang mengitari inti.

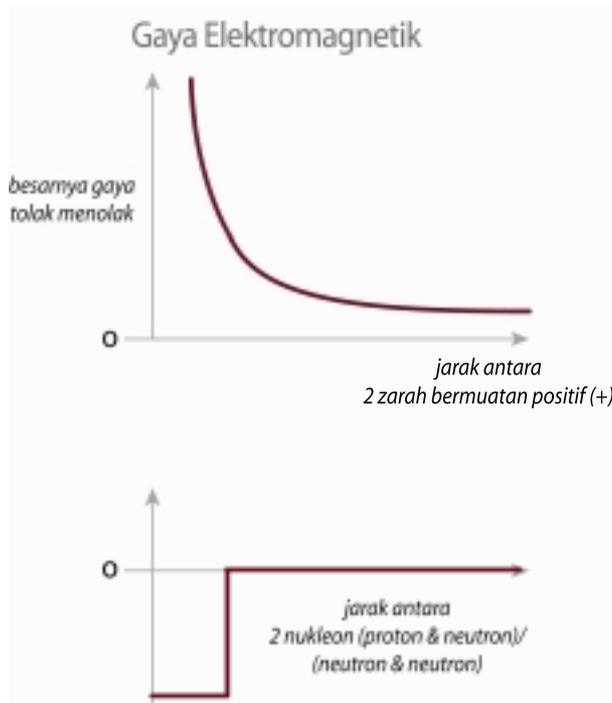
Di atas telah dicatat bahwa struktur inti dengan jumlah proton atau neutron yang genap adalah lebih stabil ketimbang yang jumlah proton atau neutronnya ganjil. Apabila kedua-duanya proton dan neutron jumlahnya genap maka struktur nukleon menjadi sangat stabil. Ternyata bahwa sifat nukleon sedemikian rupa, bilamana jumlah protonnya atau jumlah neutronnya memiliki angka genap tertentu yang disebut 'ajaib', maka ia adalah nukleon yang ekstra stabil. Apalagi bilamana kedua-duanya jumlah proton dan neutron memiliki jumlah angka ajaib ini, maka nukleon tersebut menjadi 'super' stabil. Angka-angka ajaib itu adalah 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Nomor atom Z yang memiliki angka ajaib adalah He, O, Ca, Ni, Sn, dan Pb. Sn dengan $Z=50$ memiliki 10 isotop yang stabil yang terdapat di alam, dan banyak lainnya yang radioaktif dengan nomor massa dari 100 sampai dengan 134.

Gaya Nuklir

Apabila antara dua proton terdapat gaya listrik yang saling tolak menolak, sudah tentu gaya antar beberapa proton di dalam suatu inti atom yang volumenya amat kecil merupakan gaya yang cukup besar dan cenderung memecah-belah. Tetapi inti atom tetap utuh karena antar nukleon terdapat gaya nuklir yang amat kuat saling tarik menarik tetapi yang bekerja hanya pada jarak pendek. Gaya nuklir ini khas, karena bila antara nukleon berjarak lebih dari sebutir nukleon maka gaya nuklirnya tidak ada dan tidak bekerja.. Seakan-akan butir-butir nukleon itu melekat kuat karena bergandengan tetapi kalau di luar jangkauan maka sama sekali tidak ada gaya tarik menarik.

Gaya ketiga yang ada di alam, yaitu gaya berat atau gaya gravitasi, sudah tentu juga bekerja, akan tetapi dalam alam atom tak diperhitungkan karena amat sangat kecil ketimbang yang lainnya.

Menurut teori fisika nuklir yang kemudian berkembang sejak tahun 1950an, gaya nuklir dapat dijelaskan dengan pengetahuan mengenai struktur nukleon (neutron dan proton). Kini dipercaya bahwa zarah azasi terdiri atas 6 macam quark, 6 jenis lepton, dan apa yang disebut "pembawa gaya". Keenam quark dan keenam lepton juga memiliki "saudara kembar"-nya masing-masing yang disebut "anti-zarah". Namun pengetahuan tentang komposisi dan struktur nukleon tidak mutlak diperlukan untuk memahami perilaku reaktor nuklir.

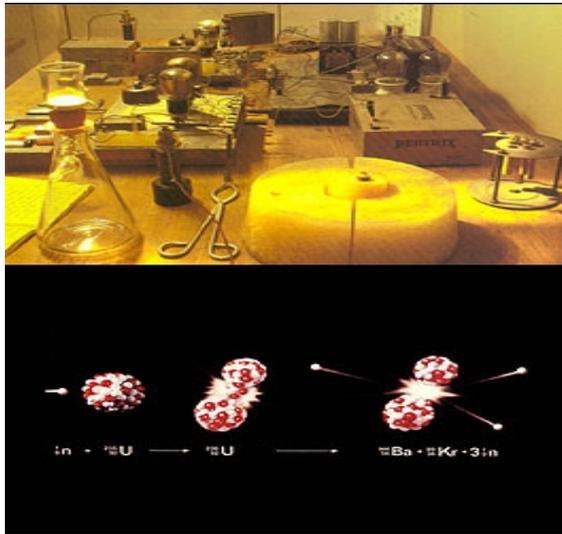


Gambar 9. Gaya elektromagnet (tolak-menolak) dan gaya nuklir (kuat/jarak-dekat); gaya negatif berarti untuk memisahkan dua nukleon, energi harus ditambah

Penemuan Pembelahan Inti

Penemuan neutron juga menambah alat penyelidikan inti atom, karena neutron dapat dihasilkan dari reaksi inti dan digunakan serta diarahkan untuk menimbulkan reaksi nuklir lain. Demikianlah maka serangkaian percobaan dilakukan dengan menggunakan neutron, di antaranya diarahkan terhadap uranium dengan maksud untuk mendapatkan unsur trans-uranium, yaitu unsur yang memiliki nomor atom lebih dari 92. Maka pada tahun 1938-39 Hahn dan Strassmann menemukan reaksi pembelahan inti uranium setelah menyimpulkan bahwa di antara hasil reaksi itu terdapat barium yang bernomor atom 56. Kesimpulan diambil setelah berulang kali upaya pemisahan dilakukan, akan tetapi mereka tetap tak dapat menyangkal bahwa yang didapatkan adalah barium. Perihal pembelahan inti, hal ini dikonsultasikan dengan dan didapatkan konfirmasi oleh para ahli fisika Meitner dan Frisch.

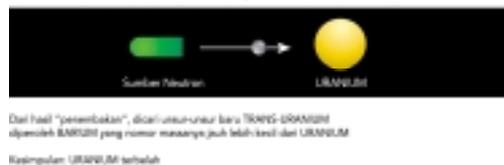
Berikut ini adalah gambar-foto laboratorium tempat kerja Otto Hahn.



Gambar 10. Foto laboratorium Otto Hahn dan skema reaksi pembelahan inti uranium-235.

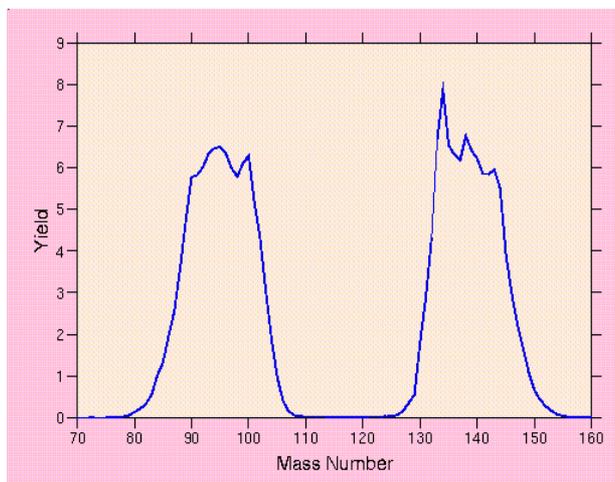
Reaksi pembelahan inti terjadi terhadap inti atom U^{235} apabila ia menangkap neutron. Inti tersebut menjadi inti U^{236} yang sangat tidak stabil dan membelah menjadi dua belahan yang nomor massanya cenderung sekitar 136 dan 96, masing-masing berenergi kinetik yang tinggi. Selain itu ada dua atau tiga neutron terlepas dengan kecepatan tinggi. Sudah tentu hukum konservasi massa menghendaki jumlah nukleon tetap 236. Bila 2 butir neutron lepas maka nomor massa belahan 137 dan 97, atau 135 dan 99, atau 134 dan 100, dan seterusnya. Bila 3 butir neutron yang lepas maka nomor massa belahan bisa 136 dan 97, atau 132 dan 101, dan seterusnya. Ada juga yang pasangannya lebih timpang, misalnya 150 dan 83, atau lebih seimbang seperti misalnya 114 dan 119, akan tetapi peluang terjadinya pasangan seperti ini lebih kecil ketimbang sekitar 136 dan 96.

Reaksi Neutron dengan Uranium



Gambar 11. Zarah neutron diarahkan ke uranium, dari hasilnya dicari unsur trans-uranium, tetapi yang diperoleh barium.

Dengan demikian maka kombinasi pasangan hasil-belah banyak sekali pilihannya, akan tetapi massa hasil-belah cenderung sekitar 136 dan 96, yaitu sebanyak sekitar 6 persen. Distribusi massa hasil-belah dapat dilihat dari grafik berikut dalam Gambar 12.



Gambar 12. Hasil-belah pada umumnya memiliki massa berkisar sekitar 136 dan 96. “Yield” berarti prosentase banyaknya hasil-belah; “Mass Number”=Nomor Massa.

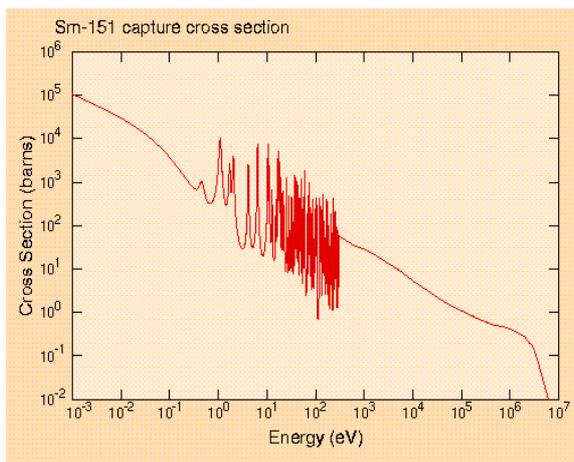
Hasil-belah Xenon-135 ($Z=54$, $N=81$, $T=9,14j$) termasuk yang banyak dihasilkan, yaitu sekitar 6% ; Z adalah nomor atom atau jumlah proton, N adalah jumlah neutron, dan T adalah waktu paroh, dalam hal ini 9,14 jam. Dengan jumlah neutron yang kurang satu dari angka “ajaib” 82, nuklida ini tergolong penangkap besar neutron, sehingga di dalam reaktor nuklir ia berperan sebagai “racun”. Hal ini berdampak pada operasi reaktor.

Reaksi Neutron

Ternyata neutron, berkat sifat netralnya, sangat mudah menembus materi (periksa Gambar 1, di mana tampak bahwa sebagian besar materi adalah ruang hampa). Tetapi ia juga mudah ditangkap oleh inti atom atau nuklida dalam materi, istimewa kalau kecepatannya rendah. Seperti juga apabila kita hendak menangkap bola, misalnya dalam permainan baseball atau kasti, bola lebih mudah ditangkap bilamana laju kecepatannya lambat ketimbang laju yang cepat. Hal ini berlaku juga bagi neutron, dan semua nuklida memiliki sifat penampang daya tangkap yang

demikian. Berikut ini adalah satu contoh mengenai sifat nuklida, dalam hal ini adalah nuklida samarium-151, Sm^{151} , yaitu grafik berskala logaritmik yang melukiskan penampang daya-tangkap dalam satuan “barn” untuk neutron berenergi dari seperseribu ev (elektron-volt) hingga satu juta ev. Penampang daya tangkap pada energi sangat rendah adalah seratus ribu barn sedang pada energi sangat tinggi adalah di bawah nilai satu. Namun harap diperhatikan bahwa di antara nilai energi neutron tersebut, khususnya antara 1 ev hingga 300 ev, grafik penampang daya-tangkap memperlihatkan sifat khas yaitu seakan bergejolak naik-turun secara tajam. Hal ini adalah gejala yang disebut resonansi: pada nilai energi tertentu yang pasti penampang daya tangkap meningkat amat tinggi, di luar nilai itu penampang daya tangkapnya jauh lebih rendah.

Semua unsur dan nuklida memperlihatkan sifat seperti yang dilukiskan untuk Sm^{151} termasuk uranium, dan tidak hanya penampang untuk daya-tangkap saja tetapi juga untuk reaksi nuklir lainnya seperti reaksi pembelahan inti dan reaksi benturan elastik serta reaksi benturan tak-elastik. Masing-masing penampang memiliki grafik yang khas untuk setiap nuklida.



Gambar 13. Grafik penampang daya-tangkap Sm^{151} terhadap neutron; perhatikan skala logaritmik. Makin kecil energi neutron makin besar daya-tangkap Sm^{151} .

Reaksi Berantai

Terlepasnya 2 atau 3 butir neutron dari reaksi pembelahan inti uranium, menimbulkan gagasan dapat terjadinya reaksi berantai, yaitu reaksi pembelahan inti selanjutnya oleh sedikitnya salah satu neutron yang lepas. Hal ini diungkapkan pertama kali oleh Leo Szilard, fisikawan berasal dari Hongaria. Pembelahan inti

nuklida bahan moderator, yaitu bahan dengan nomor atom rendah yang berfungsi memperlambat kecepatan neutron. Bahan seperti air dan grafit.

Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah bangunan yang didisain dan didirikan sedemikian rupa sehingga di dalamnya dapat terjadi reaksi berantai berdasarkan reaksi pembelahan inti seperti dibahas di muka. Menurut penghitungan di atas kertas, reaktor nuklir tidak dapat berjalan bilamana bahan bakarnya uranium alam dan bahan moderatornya air. Alasannya ialah karena air turut menyerap neutron sehingga tidak cukup tersedia untuk melanjutkan reaksi berantai secara berkesinambungan. Yang memungkinkan ialah apabila bahan moderatornya air berat atau grafit, karena kedua bahan ini hanya sedikit menyerap neutron. Bahan grafit yang dipilih, karena lebih mudah tersedia, sedang air berat memerlukan proses pengayaan air seperti pengayaan uranium (walaupun lebih “mudah” karena perbedaan berat antara air biasa dengan air berat cukup berarti). Maka dipilihlah bekas lapangan squash di bawah lapangan bola Universitas Chicago untuk membangun reaktor nuklir pertama oleh Enrico Fermi dan kawan-kawan. Karena baru dalam proses penciptaan reaktor, tidak diperlukan bahan pendingin: reaktor hanya akan bekerja dengan daya praktis nol. Kekritisan reaktor nuklir pertama dicapai pada tanggal 2 Desember 1942 dan keadaan kritis reaktor dipertahankan selama 28 menit.

Berikut ini adalah lukisan yang menggambarkan suasana yang terjadi selama percobaan yang bersejarah itu di dalam bekas lapangan squash Universitas Chicago.

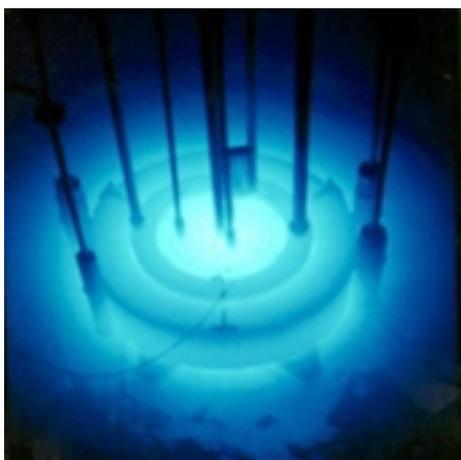


Gambar 15. Lukisan menggambarkan suasana ketika reaksi berantai pembelahan inti berhasil dilaksanakan pada tanggal 2 Desember 1942.

Di sebelah kanan adalah tumpukan grafit yang dikenal dengan nama “Chicago Pile” yang menjadi cikal bakal semua reaktor nuklir di dunia. Di sebelah kiri adalah sejumlah ilmuwan yang berperan-serta dalam percobaan tersebut.

Di bawah ini adalah gambar-foto sebuah teras reaktor jenis kolam air, yaitu jenis reaktor Triga Mark-II seperti yang ada di Pusat Penelitian Tenaga Nuklir BATAN di Bandung. Bahan bakarnya berbentuk silinder dan berdiri di atas kisi-kisi. Bahan moderatornya air murni biasa tanpa kandungan mineral (*demineralised water*). Pendinginan reaktor dilakukan oleh air yang mengalir dari bawah ke atas.

Gambar-foto diambil dengan cahaya dari radiasi Cerenkov, yaitu gelombang elektromagnetik (cahaya) yang dipancarkan berkat gerakan elektron cepat dalam air. Elektron adalah sinar beta yang berasal dari hasil-belah pembelahan inti yang terjadi di dalam batang bahan bakar. Radiasi Cerenkov hanya timbul akibat gerakan elektron cepat dalam air yang melebihi kecepatan cahaya di dalam air.



Gambar 16. Reaktor nuklir sederhana untuk riset(Triga Mark-II, seperti yang ada di BATAN Bandung) , dengan teras reaktor di tengah “kolam air” terdiri atas batang-batang bahan bakar, dan air berperan sebagai bahan moderator maupun sebagai bahan pendingin. Cahaya berasal dari radiasi Cerenkov.

Dalam perkembangan desain reaktor selanjutnya bahan-bahan reaktor nuklir terdiri atas bahan bakar nuklir, lazimnya uranium diperkaya (supaya dapat memakai air sebagai moderator), terdapat dalam kelongsong panjang dan kelongsongnya dibuat dari logam yang tidak menyerap neutron yaitu zirkon dalam bentuk campuran logam dengan aluminium disebut zirkaloy. Bahan lainnya adalah bahan moderator, terdiri atas bahan nomor Z dan A ringan dan memiliki daya-serap

kecil terhadap neutron. Bahan moderator adalah air murni, air berat (D_2O), atau karbon dalam bentuk grafit (zat arang murni). Satu bahan lagi diperlukan di dalam reaktor nuklir, yaitu bahan pendingin yang diperlukan untuk mendinginkan batang-batang bahan bakar guna pencegahan pelelehan. Bahan pendingin dapat dipilih dari antara air murni, air berat, dan gas (gas oksida karbon atau helium).

Dengan demikian reaktor nuklir adalah suatu bangunan di mana terdapat banyak neutron bertebaran, berasal dari reaksi pembelahan inti U^{235} dengan energi kinetik amat tinggi (sekitar 1 – 2 Mev) yang kemudian mengalami beberapa kali benturan dengan inti atom moderator sehingga mengalami penurunan energi kinetik (di bawah 1 ev, bahkan di bawah 0,1 ev). Bilamana telah mencapai kecepatan yang lambat, akibat berbagai benturan dan tumbukan tadi, maka neutron berpeluang lagi untuk diserap oleh U^{235} dan menimbulkan reaksi pembelahan inti U^{235} . Sebagian neutron tentu diserap oleh inti atom bahan moderator (karena itu dipilih bahan moderator yang tidak mudah menyerap neutron tetapi memiliki nomor A kecil supaya benturan dengan neutron bisa memperlambat neutron), dan sebagian (kecil) neutron lagi dapat menyelinap jauh dari bahan bakar nuklir sampai tertangkap bahan moderator atau bahan struktural reaktor (bejana baja atau beton pelindung).

Dengan banyaknya neutron yang “berkeliaran” di dalam reaktor nuklir maka reaksi nuklir dapat dengan mudah terjadi apabila sesuatu bahan atau zat ditempatkan di dalam reaktor nuklir. Pada umumnya sifat materi adalah apabila inti atom menangkap neutron maka ia menjadi kurang stabil dan menjadi radioaktif, khususnya pemancar sinar beta.

Fisika Reaktor

Dalam reaktor nuklir yang tengah bekerja (sedang terjadi reaksi berantai) reaktor dipenuhi dengan sejumlah neutron yang berkeliaran dan berlalu-lalang, masing-masing dengan kecepatannya sendiri tetapi pada umumnya tergolong neutron yang lambat. Neutron memang berasal dari hasil pembelahan inti U^{235} yang memiliki kecepatan sangat tinggi, namun ia dengan cepat diperlambat oleh benturan dengan inti atom moderator. Sekian banyak neutron itu memiliki nilai kecepatan yang amat bervariasi, dengan distribusi nilai kecepatan yang mirip dengan distribusi kecepatan molekul pada gas dalam suatu ruangan. Distribusi kecepatan ini dapat dilukiskan dengan sebuah kurva yang disebut kurva Maxwell-Boltzmann.

Kerapatan neutron atau rapat jenis neutron dalam reaktor nuklir sangat bergantung pada kecepatan neutron dan posisi di dalam reaktor. Di dalam batang bahan bakar, kerapatan neutron lambat memiliki nilai rendah ketimbang di dalam moderator, karena di dalam batang bahan bakar terjadi banyak penyerapan neutron lambat oleh bahan bakar uranium. Di dalam moderator jumlah neutron lambat yang diserap hanya sedikit dan sebaliknya banyak neutron cepat yang baru lepas dari

reaksi pembelahan inti yang bertumbukan dengan inti moderator yang mengalami pengalambatan.

Sebaliknya kerapatan neutron cepat jauh lebih tinggi di dalam batang bahan bakar ketimbang di dalam moderator, karena neutron baru saja dilepas dari reaksi pembelahan inti uranium. Sedang di dalam moderator neutron cepat dengan mudah berubah menjadi neutron lambat karena berkali-kali tumbukan dengan inti atom moderator.

Reaktor Nuklir bukan Bom Nuklir

Banyak anggota masyarakat awam yang menduga bahwa reaktor nuklir tidak ubahnya seperti bom nuklir, yaitu memiliki sifat dapat sewaktu-waktu meledak. Ini adalah pendapat yang sangat keliru, walaupun tidak dapat dipersalahkan kepada siapa pun juga mengingat introduksi umat manusia kepada energi nuklir adalah melalui jatuhnya bom atom di Hiroshima dan Nagasaki pada tanggal 6 dan 9 Agustus 1945. Memang benar bahwa baik bom atom maupun reaktor nuklir sama-sama bekerja berdasarkan reaksi berantai. Akan tetapi laju kecepatan reaksi berantai pada kedua hal itu amat berbeda: pada bom atom sekurang-kurangnya seribu kali lebih cepat ketimbang pada reaktor nuklir. Hal inilah yang membedakan keduanya (lihat Gambar 11 di bawah ini).

Sebuah bom memerlukan terhimpunnya sejumlah energi yang amat besar dalam jangka waktu sekejap, yang berarti seluruh reaksi berantai terjadi nyaris bersamaan. Hanya dengan cara demikian akan terhimpun jumlah energi yang bakal memiliki daya-ledak yang kuat: sejumlah energi amat besar yang tiba-tiba muncul dalam volume terbatas akan menimbulkan tekanan yang amat besar secara tiba-tiba pula. Hal ini sesuai rumus yang berlaku bagi gas:

$$p \cdot V = R \cdot T$$

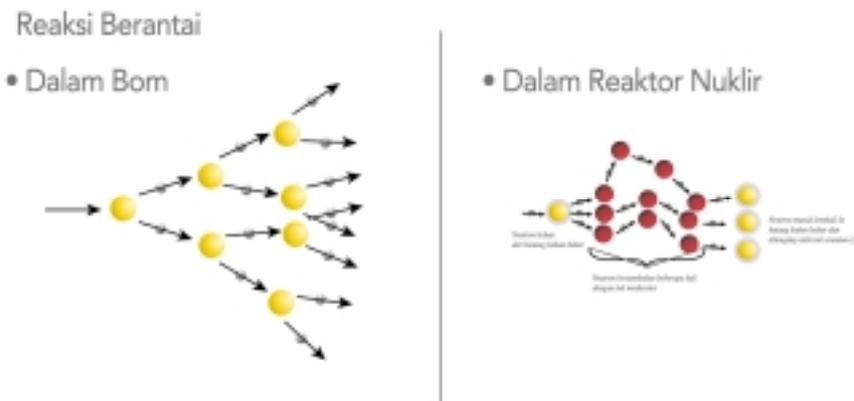
Agar sebuah bom nuklir berhasil meledak, diperlukan sejumlah massa kritis bahan ledak, yaitu U_{235} murni atau Pu_{239} murni, yang semula terbagi dua atau beberapa bagian, tetapi pada saat diledakkan secara sekejap digabungkan menjadi massa kritis dan memicu reaksi berantai tak terkendalikan.

Apabila proses reaksi berantai berjalan lamban seperti di dalam reaktor nuklir maka energi yang lepas itu akan menjalar ke atom dan molekul sekitarnya melalui proses konduksi akibat benturan hasil-belah dan selanjutnya konveksi dalam air, akan tetapi tidak akan terhimpun menjadi energi panas yang dahsyat. Energi panasnya akan merambat melalui proses konduksi dan konveksi dan tidak akan timbul tekanan yang besar.

Hal penting yang membedakan reaktor nuklir dari bom nuklir adalah bahan bakar nuklir dalam PLTN hanya mengandung 3 sampai 5 persen U^{235} , uranium selebihnya adalah U_{238} yang tidak mengalami pembelahan inti dengan neutron lambat yang terdapat di dalam reaktor nuklir. Jadi tidak ada U^{235} murni dan

mustahil sejumlah massa kritis U^{235} dapat terbentuk. Uranium yang lebih banyak adalah isotop U^{238} , yang hanya sebagian daripadanya menangkap neutron dan berubah menjadi Pu^{239} .

Selain itu, hal lain yang membuat reaktor nuklir bukan bom adalah bahwa reaktor nuklir sudah dilengkapi dengan peralatan yang dapat digunakan untuk mengendalikan tingkat daya dan energi yang dibangkitkan di dalam reaktor nuklir. Batas tingkat daya dan energi yang dibangkitkan ditentukan dalam desain reaktor nuklir, misalnya 30 MW_{th} seperti pada reaktor serba-guna Siwabessy atau 3000 MW_{th} seperti dalam PLTN berkapasitas 1000 MW.



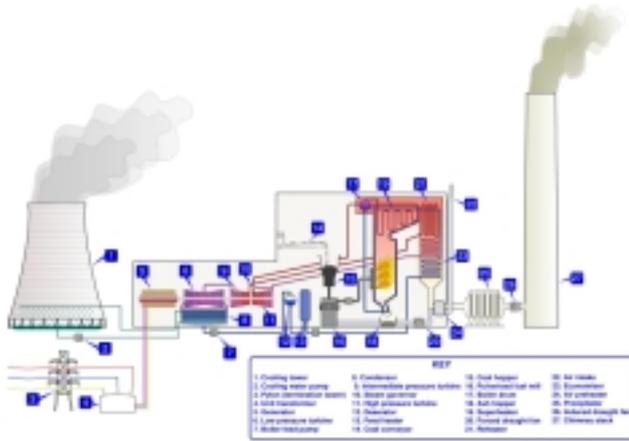
Gambar 17. Reaksi berantai dalam bom, dan dalam reaktor nuklir. Dalam bom, neutron yang lepas langsung ditangkap oleh inti uranium atau plutonium dan menyebabkan pembelahan inti berikutnya. Dalam reaktor nuklir neutron yang lepas berbenturan dahulu dengan nuklida moderator (dalam hal reaktor jenis air tekan, jumlah benturan rata-rata 18 kali sebelum ditangkap oleh uranium-235 dan menyebabkan pembelahan inti berikutnya). Neutron bergerak lambat dan reaksi berantai seribu kali lebih lambat ketimbang bom.

Jenis-jenis Reaktor Nuklir yang dibangun dalam Pusat Listrik Tenaga Nuklir

Di bagian ini disajikan berbagai gambar-skema dan gambar foto beberapa jenis PLTN serta komponen-komponennya, sekedar sebagai pengenalan bagi para pembaca. Namun, terlebih dahulu berikut ini dikutipkan gambar skema PLTU-batubara, untuk dapat dilihat persamaan dan perbedaannya dengan PLTN.

Dalam PLTU-bb batubara dari tempat penyimpanan disalurkan dengan konveyor (No.14) ke alat pencurah (No.16) untuk dijadikan serbuk sebelum dibakar. Panas pembakaran memanasi pipa-pipa pembangkit uap (No.17, 19 dan 21) dan uapnya disalurkan ke turbin tekanan tinggi, tekanan

menengah dan tekanan rendah (No. 11, 9 dan 6) yang ketiga-tiganya memutar generator atau pembangkit listrik (No.5). Listriknya mengalir ke transformator (No.4) dan ke sistem transmisi (No.3).



Gambar 18. Skema pusat listrik tenaga uap dengan bahan bakar batubara PLTU-bb.

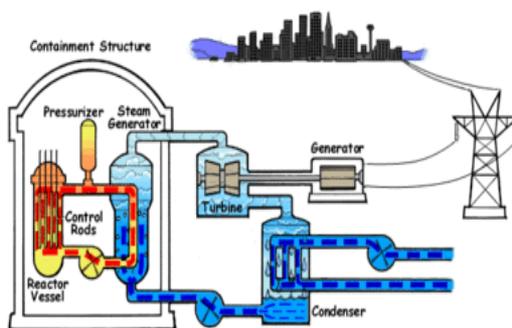
Wujud suatu PLTU-bb seperti yang dilukiskan dalam gambar skema di atas adalah sebuah PLTU yang dapat dilihat dari gambar-foto berikut ini, yaitu PLTU Ekibastus, tetapi tanpa menara pendingin (No.1 dalam skema). Di Indonesia sudah ada beberapa PLTU-bb, di antaranya di Suralaya, Paiton, Cilacap, dan Tanjung Jati, semuanya juga tanpa menara pendingin karena berlokasi di tepi pantai dan pendinginan kondensator dilakukan dengan menyedot air laut.



Gambar 19. Foto salah satu PLTU-batubara di Eropa.

Bagian-bagian utama PLTN jenis PWR memiliki kemiripan dengan PLTU-batubara di atas. Berikut ini adalah gambar skema PLTN jenis PWR. Kiranya hanya sampai di sinilah kemiripannya, karena dalam kenyataannya spesifikasi teknik dan desain komponen-komponennya, walaupun diberi nama yang sama, tetapi sangat berbeda. Kinerja termal PLTU-batubara jauh lebih unggul daripada PLTN, karena suhu uap ke turbin jauh lebih tinggi (bisa mencapai 400 derajat Celsius) dan efisiensi termal dapat mencapai 40 persen. Dalam PLTN jenis PWR hanya sekitar 280 derajat Celsius dan 32 persen. Akan tetapi persyaratan tehnik lainnya bagi PLTN jauh lebih ketat, seperti misalnya tingkat kemurnian bahan-bahan di dalam reaktor, ketahanan terhadap radiasi, dan tekanan air dalam sistem primer yang amat tinggi.

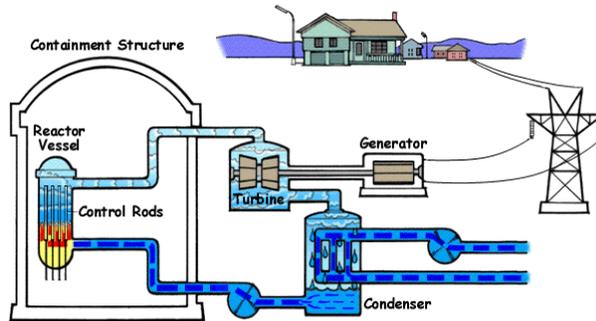
PLTN terdiri atas dua bagian: Sistem Pemasok Uap Nuklir (*nuclear steam supply system*) di mana terletak reaktor nuklir berikut pembangkit uap dan Instalasi Pendukung (*balance of plant*) di mana terdapat turbin uap dan pembangkit listrik atau *generator*. Sebagian besar PLTN di dunia, 265 dari jumlah 438 pada bulan Agustus 2007 menurut data IAEA, adalah dari jenis PWR (*pressurized water reactor*) seperti dalam bagan di bawah. Dalam Sistem Pembangkit Uap Nuklir (kiri) terdapat bejana tekan reaktor dan pembangkit uap: daur primer air tekan dipompa masuk ke dalam bejana, mendinginkan teras reaktor, dan keluar ke pembangkit uap di mana panas/bahangnya dialihkan ke daur sekunder yang dijadikan uap¹⁰. Air daur sekunder didinginkan oleh air dari laut atau sungai besar. Air daur primer pada tekanan amat tinggi: 150 atm., suhu air yang mengalir ke pembangkit uap: 315 derajat Celsius. Pembangkit uap menghasilkan uap pada suhu 275 derajat Celsius dan tekanan 60 atm. yang masuk ke turbin uap (lihat Gambar 12 di bawah ini).



Gambar 20. Skema PWR, dengan sistem pemasok uap nuklir (reaktor nuklir dan pembangkit uap) di sebelah kiri dan turbin uap, pembangkit listrik serta kondensor di sebelah kanan. Bahan bakarnya uranium dengan perkayaan (kadar U^{235}) 3-4 persen.

¹⁰ Tidak digambarkan dalam bagan di atas: perangkat yang disebut *pressurizer* yang berfungsi menjaga agar tekanan air dalam daur primer tetap (tak berubah).

Di bawah ini disajikan gambar skema PLTN jenis BWR yang lebih sederhana ketimbang jenis PWR. Tidak ada komponen pembangkit uap karena fungsi ini dirangkap oleh reaktor nuklir. Dengan demikian di bagian atas reaktor terjadi pendidihan air, dan uap dipisahkan kemudian disalurkan ke turbin uap.



Gambar 21. Skema PLTN jenis BWR dengan jumlah komponen yang kurang ketimbang PWR karena tidak ada pembangkit uap. Fungsi tersebut dirangkap reaktor, yang bahan bakarnya uranium diperkaya 3-4 persen seperti PWR.

Dalam PLTN jenis BWR hanya terdapat satu daur: air tekan di dalam bejana reaktor pada tekanan 75 atm. di mana di bagian atas teras reaktornya dibiarkan terjadi pendidihan: uap dihasilkan pada suhu 286 derajat Celsius dan dialirkan ke turbin uap. Dengan demikian dalam PLTN jenis ini tidak terdapat perangkat pembangkit uap, yang fungsinya diberikan atau diambil-alih oleh reaktor. Menurut data IAEA dewasa ini (agustus 2007) jumlah PLTN jenis ini adalah 94 buah.

PLTN jenis BWR ini memiliki keuntungan berupa biaya modal yang lebih rendah ketimbang jenis PWR karena jumlah komponen yang lebih kecil, akan tetapi kinerja termalnya juga lebih rendah karena suhu uap sedikit lebih rendah. Dari segi operasi ada kekurangannya yaitu bagian turbin terkena radiasi dari air primer melalui reaksi (n,p) (lihat halaman ..), dan pekerja PLTN harus menghindari ruangan turbin. Namun radioaktivitas berumur pendek ini tidak berpengaruh terhadap kinerja termal PLTN jenis BWR.

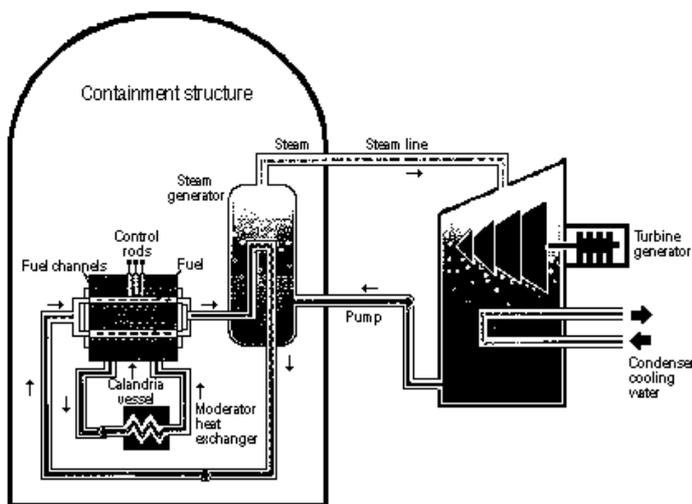
Ciri lain yang membedakan BWR dari PWR adalah perlengkapan batang-kendali yang ditempatkan di bawah teras reaktor (karena uap dibangkitkan di bagian atas reaktor). Untuk memadamkan reaktor batang-kendali harus digerakkan ke atas (dalam PWR cukup dengan gaya gravitasi).

Pada awal perkembangan reaktor nuklir sebagian besar PLTN menggunakan jenis reaktor GCR. Selain karena percobaan untuk menciptakan reaktor nuklir pertama memang menggunakan grafit sebagai bahan moderator dan uranium alam sebagai bahan bakar nuklir (tidak perlu uranium diperkaya), juga karena alasan

bahan grafit termasuk mudah diperoleh di mana mana. Reaktor nuklir jenis inilah yang dibangun di Hanford, negara bagian Washington, Amerika Serikat, yang bertujuan menghasilkan plutonium untuk bahan bom atom. Inggris pun menggunakan jenis yang sama untuk menghasilkan plutonium dengan sekaligus memanfaatkan panas gas pendinginnya untuk membangkitkan uap dan memutar turbin uap yang dihubungkan dengan generator listrik. Inilah PLTN di Calder Hall yang mulai beroperasi pada tahun 1956. Yang dipilih sebagai gas pendingin adalah CO₂.

Sebagai bahan moderator, yang berfungsi memperlambat kecepatan neutron hasil fisi uranium, grafit memiliki sifat yang “baik”, yaitu hanya sedikit menyerap neutron, namun sebagai pelambat neutron ia kurang berhasil-guna (efektif). Hal ini dikarenakan massa inti unsur C yang bermassa 12 sma, yang jauh lebih tinggi ketimbang neutron. Seperti halnya bola bilyar, zarah neutron akan terhenti diam jika berbenturan langsung dengan massa yang se-ukuran atau yang masanya sebanding. Jika membentur bola yang jauh lebih besar massanya, maka ia cenderung terpelanting dengan kecepatan hampir semula. Karena itu dalam reaktor nuklir yang memakai grafit sebagai bahan moderator dan uranium alam sebagai bahan bakar, proses memperlambat kecepatan neutron harus banyak sekali mengalami benturan berulang terhadap neutron, maka ukuran fisik reaktornya harus besar¹¹. Akibatnya bejana tekan yang digunakan harus besar pula.

Gambar skema berikut adalah mengenai PLTN jenis air berat, yaitu HWR (*heavy water reactor*) atau PHWR (*pressurized heavy water reactor*).



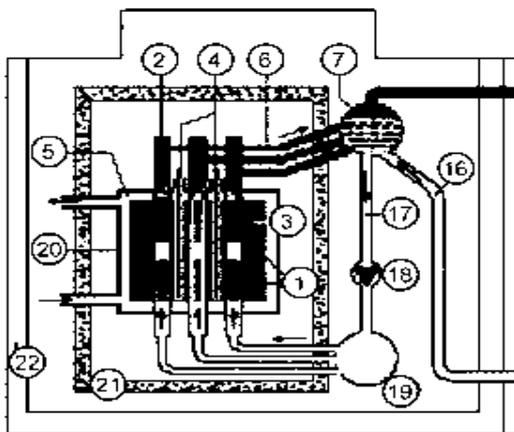
Gambar 22. PHWR (pressurized heavy water reactor) atau HWR.

¹¹ PLTN di Inggris memakai grafit sebagai bahan moderator; hanya ada satu PLTN jenis PWR.

Berbeda dengan PWR atau BWR, jenis reaktor ini tidak menggunakan bejana tekan, akan tetapi tetap memakai air berat bertekanan tinggi yang disalurkan melalui tabung-tabung tekan, dengan perangkat bahan bakar diletakkan di dalam tabung tekan dalam sikap horisontal. Air berat sebagai pendingin reaktor disalurkan melalui tabung tekan, mendinginkan perangkat bahan bakar, mengalami kenaikan suhu, dan disalurkan ke pembangkit uap sebagai sumber panas.

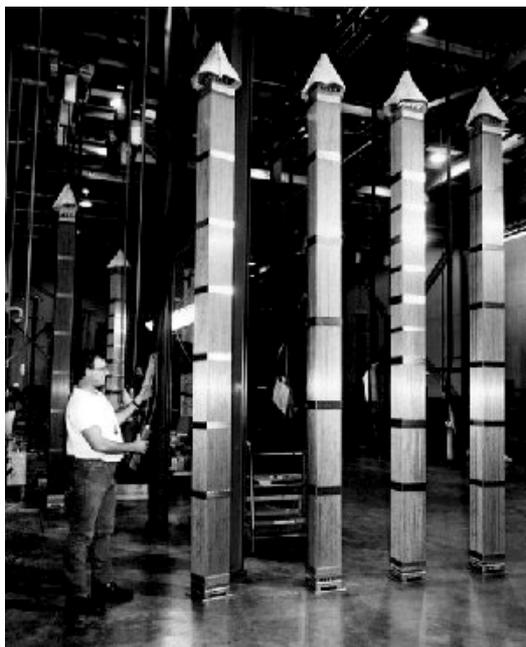
Sejumlah tabung tekan (200-300, bergantung daya reaktor) terpasang di dalam bejana yang disebut *Calandria* yang menampung moderator air berat. Tiap tabung tekan tidak ada hubungan dengan tabung yang lain dan karena itu, dengan bantuan perlengkapan khusus untuk penggantian bahan bakar, tiap tabung dapat diakses selama PLTN beroperasi. Kemampuan untuk mengganti bahan bakar sambil reaktor beroperasi adalah ciri khas PHWR yang membedakannya dari PWR atau BWR yang harus menghentikan operasi reaktor selama 4-6 minggu untuk penggantian bahan bakar (sambil melaksanakan kegiatan perawatan rutin terhadap semua perlengkapan dan peralatan).

Gambar skema berikut memperlihatkan reaktor jenis RBMK, yang memiliki ciri-ciri seperti PHWR: batang bahan bakar di dalam tabung tekan, tetapi sikap tabung tekan dan bahan bakar berdiri secara vertikal, dan perbedaan penting lainnya adalah bahan moderator terdiri dari grafit yang zat padat. Reaktor nuklir seperti ini memiliki koefisien reaktivitas positif; apabila operasi menyimpang (misalnya reaksi nuklir meningkat) reaktor bahkan cenderung meningkatkan reaksinya. Karena itu reaktor jenis ini harus memiliki kemampuan pemadaman reaksi yang berlebih.



Gambar 23. PLTN jenis RBMK adalah desain diciptakan oleh Rusia di zaman Uni Soviet, memiliki tabung-tabung tekan seperti PHWR tetapi sikapnya berdiri dan ditempatkan di dalam lubang-lubang yang ada dalam grafit sebagai bahan moderator. Pendinginnya adalah air murni biasa dan uraniumnya diperkaya.

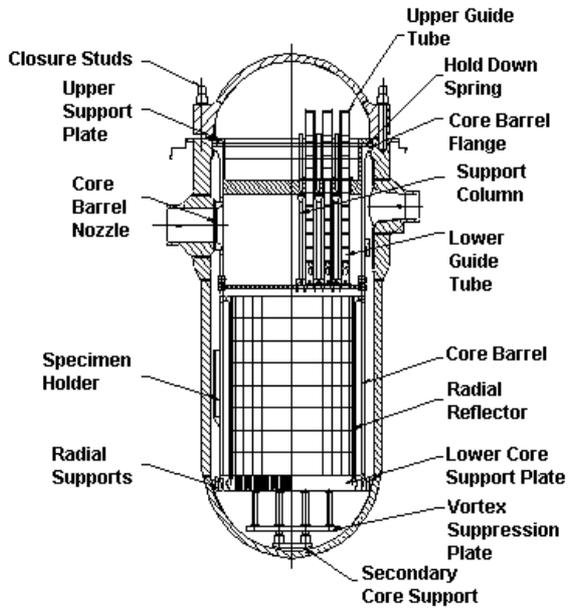
Dalam reaktor nuklir jenis PWR bentuk kimiawi bahan bakar adalah UO₂ dengan kadar U235 3-4 persen. Bentuk fisiknya adalah peluru disebut pellet yang dimasukkan ke dalam batang kelongsong sepanjang 4 meter. Batang-batang disusun dengan formasi 17 x 17 membentuk perangkat bahan bakar nuklir.



Gambar 24. Foto perangkat bahan bakar nuklir (nuclear fuel assembly) dengan panjang 4 meter, terdiri atas kumpulan batang-batang panjang berisi UO₂ dalam bentuk peluru (atau pellet) berkelongsong. Di dalam batang-batang ini seluruh hasil-belah nantinya terperangkap.

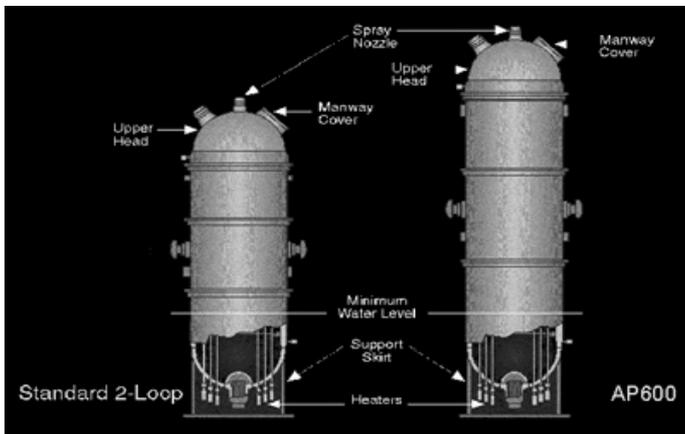
Gambar-foto di atas adalah perangkat bahan bakar nuklir, komponen penting reaktor nuklir dalam PLTN jenis PWR desain maju, yaitu AP600 atau Advanced Pressurized Water Reactor berkapasitas 600 MW¹² yang panjangnya 4 meter.

¹² Ini adalah desain perusahaan Westinghouse, kini milik perusahaan Toshiba.



Gambar 25. Bagan yang memperlihatkan penampang bejana tekan reaktor AP600, memperlihatkan juga posisi teras reaktor serta bagian dalam reaktor lainnya.

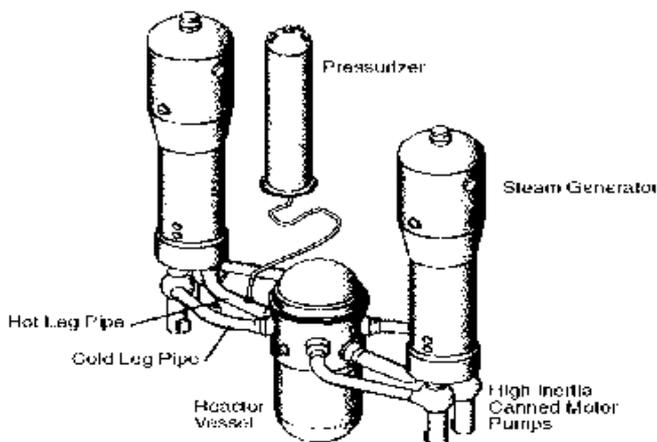
Yang di bawah ini adalah gambar pressurizer PLTN PWR 600 MW (kiri) dan pressurizer AP600 (kanan) yang lebih besar dan lebih handal.



Gambar 26. Gambar-foto pressurizer PLTN jenis PWR (kiri) dan AP600 (kanan).

Berikut ini adalah bagan PLTN AP600, khusus mengenai sistem penyedia uap nuklir yang terletak di dalam Sistem Pemasok Uap Nuklir dengan satu bejana reaktor, dua pembangkit uap, dan satu pressurizer. Untuk PLTN PWR berkapasitas 900 MW jumlah pembangkit uapnya tiga buah.

The AP600 Uses a Nuclear Steam Supply System Proven in the Field



Gambar 27. Skema sistem pemasok uap nuklir dalam desain AP600 (dua untai).

Paparan Radiasi dan Dosis radiasi

Masyarakat awam pada umumnya merasa takut atau khawatir apabila harus ‘berhadapan’ dengan radiasi, terutama karena radiasi tidak kasat mata dan tidak menimbulkan isyarat pada indera lain (tidakberbunyi atau berbau, misalnya). Namun masyarakat awam yang tidak atau belum mengetahui juga akan merasa terheran-heran apabila diungkapkan betapa akrabnya kehidupan manusia dengan radiasi.

Pertama, di dalam tubuh kita masing-masing terdapat sejumlah kecil kalium radioaktif, yaitu K^{40} , yang pemancar sinar beta dan untuk sebagian juga memancarkan sinar gamma¹³. Selain itu nuklida ini terdapat dalam alam; dengan demikian dari alam sekitar di mana terdapat kalium (dan K^{40}) kita juga mendapatkan dosis radiasi tambahan.

¹³ Didahului dengan perubahan status keadaan energi nuklida disebut penangkapan elektron. Ini adalah alternatif terhadap pemancaran sinar beta. Elektron yang ditangkap oleh inti atom adalah salah satu elektron yang mengitari inti kalium dan berakibat pemancaran sinar gamma dari inti atom.

Kedua, selain dari K^{40} , dari alam sekitar kita juga mendapatkan dosis radiasi, terutama dari sinar kosmik, yaitu radiasi yang terus menerus menghujani bumi dan berasal dari angkasa luar. Lebih tepat sebenarnya adalah zarah kosmik, karena sebagian terbesar sinar kosmik adalah proton dan sebagian lagi adalah inti helium atau sinar alfa. Sebagian kecil adalah elektron. Sinar kosmik berasal dari matahari dan dari bintang-bintang di galaksi lain dalam jagad raya.

Di bumi kita sendiri juga terdapat zat-zat radioaktif yang memancarkan radiasi dan kita tidak luput terkena dosis daripadanya. Misalnya di pantai berpasir monasit terdapat thorium radioaktif, atau batuan granit dan batubara juga mengandung uranium yang radioaktif. Apabila kita bermukim di pegunungan maka kita akan mendapatkan dosis dari sinar kosmik yang lebih tinggi ketimbang yang bermukim di pantai. Demikian pula apabila kita sering mengadakan perjalanan udara kita pun terkena dosis radiasi yang lebih tinggi ketimbang orang yang jarang naik pesawat terbang.

Ketiga, dewasa ini pengobatan modern sudah banyak yang memakai zat radioaktif untuk terapi ataupun untuk keperluan diagnostik, termasuk di Indonesia. Rumah-rumah sakit di Indonesia sudah memakai teknik-teknik ini secara rutin. Ini tentunya juga menambah dosis yang diterima anggota masyarakat yang berkonsultasi dan berobat, dan dosis yang diterima dari perangkat sinar-X atau pesawat roentgen adalah di atas dosis yang diterima dari alam sekitar ! Di bawah ini adalah sebuah tabel yang menyajikan ikhtisar keterangan tentang pelbagai dosis yang kita terima sehari-hari.

Tabel 1. Dosis rata-rata sehari-hari

Perkiraan Dosis (dalam mikro sievert)	Kegiatan
5	Tidur bersama isteri/suami selama satu tahun
10	Menonton TV selama satu tahun
10	Menggunakan jam tangan berpendar selama satu tahun
10	Hidup di Amerika Serikat satu tahun, dari pabrik bahan bakar dan PLTN
10	Satu hari dari radiasi latar-belakang (rata-rata, sangat bervariasi di dunia)
20	Dari pengambilan foto thorax sinar-X
65	Selama penerbangan dari Melbourne ke London lewat Singapura
300	Dosis tahunan dari kalium 40 yang ada dalam tubuh
460	Dosis maksimum dari kecelakaan PLTN Three Mile Island (di luar pagar)
7000	Dosis dari PET scan
8,000	Dosis dari CT (CAT) scan untuk dada
50,000	Dosis dari kecelakaan PLTN Chernobyl di luar pagar (perkiraan sangat bervariasi)
2,000,000	Perkiraan dosis tunggal terhadap lokasi kanker dari Terapi Radiasi

Cara Perlindungan dari Sinar Radiasi: Waktu, Jarak, dan Perisai

Salah satu sebab radiasi dapat menyebabkan orang cemas adalah sifatnya yang tak terdeteksi oleh panca-indera. Deteksi radiasi atau sinar radioaktif memerlukan bantuan alat pencacah. Karena itu, di mana pun zat radioaktif digunakan atau alat pembangkit radiasi dipakai, maka haruslah terpasang rambu-rambu yang jelas bagi siapa pun yang akan lewat. Selain itu, para peneliti di laboraorium yang menggunakan zat radioaktif atau para pekerja radiasi yang sehari-hari mengoperasikan alat pembangkit radiasi atau reaktor nuklir, harus mengenakan alat pencacah dosis untuk mengetahui dosis yang diterima.

Apabila diketahui adanya sumber radiasi, maka ada pedoman ringkas yang dapat digunakan supaya dosis yang diterima seminimal mungkin, menyangkut waktu pemaparan, jarak dari sumber radiasi dan pemakaian perisai atau pelindung. Pedoman tersebut sebagai berikut :

1. Waktu pemaparan, yakni hendaknya pemaparan hanya terjadi sesingkat mungkin Jangan lama-lama membiarkan diri terkena paparan radiasi.
2. Jarak dari sumber radiasi, yaitu upayakan agar menjauhkan diri sejauh mungkin dari sumber radiasi. Jangan sekali-kali mendekati sumber radiasi.
3. Pemakaian perisai, dalam kata lain apabila tak terhindarkan maka pakailah pelindung yang terbuat dari bahan dengan nomor atom Z yang tinggi untuk berlindung dari sinar X atau sinar gamma, atau berlindung di balik tembok beton (atau bak air) yang tebal untuk mengurangi paparan zarah neutron.