

## TINJAUAN BAHAN MODERATOR UNTUK KOMPONEN REAKTOR NUKLIR

Mairing MP, Hendra Prihatnadi  
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir

### ABSTRACT

*In order for a reactor design is considered acceptable absolute technical requirement is fulfilled because the most important part of a reactor design. Safety considerations emphasis on the handling of radioactive substances emitted during the operation of a reactor and radioactive waste handling. Moderator material is a layer that interacts directly with neutrons split the nuclear fuel that will lead to changes in physical properties, nuclear properties, mechanical properties and chemical properties. Reviews moderator of this time is of the types of moderator is often used to meet the requirements as nuclear material.*

*Keywords: moderator, nuclear reactor.*

### ABSTRAK

*Agar disain suatu reactor dianggap acceptable persyaratan teknik mullak dipenuhi karena merupakan bagian yang terpenting dalam suatu disain reactor. Pertimbangan keselamatan dititik beratkan pada penanganan zat radioaktif yang dipancarkan selama beroperasinya suatu reaktor dan penanganan limbah radioaktifnya. Bahan moderator merupakan lapisan kedua yang berinteraksi langsung dengan netron hasil belah bahan bakar nuklir yang akan menimbulkan perubahan sifat fisik, sifat nuklir, sifat mekanik dan sifat kimianya. Tinjauan moderator kali ini adalah dari jenis-jenis moderator yang sering digunakan yang memenuhi persyaratan sebagai material nuklir.*

*Kata kunci : moderator, reaktor nuklir.*

### I. PENDAHULUAN

Neutron yang dilepaskan oleh fisi mempunyai energi kinetik yang relatif sangat tinggi dengan kecepatan yang sangat tinggi. Agar neutron dapat menyebabkan fisi yang berikutnya lagi, energinya harus dikurangi sampai mencapai energi termik. Untuk memperlambat neutron cepat sampai mencapai tingkat energi yang lebih rendah, neutron yang berenergi tinggi itu ditumbukkan pada atom-atom yang terdapat dalam bahan tertentu, yang disebut moderator. Syarat untuk memilih dan menentukan bahan moderator (dan reflektor) adalah:

- 1) Pada tiap tumbukan terdapat kehilangan energi neutron yang besar.
- 2) Penampang penyerapan yang rendah.
- 3) Penampang penghamburan yang tinggi.

Reflektor dipasang disekeliling teras reaktor dengan maksud agar neutron yang dihamburkan keluar dapat dipantulkan kembali ke teras reaktor. Dengan demikian kebocoran neutron dapat dikurangi.

Persyaratan teknik merupakan bagian yang penting dalam disain reaktor. Persyaratan teknik tersebut memuat hal yang mutlak harus dipenuhi agar disain suatu reaktor dianggap *acceptable*.

Pertimbangan keselamatan dari suatu reaktor umumnya dititik beratkan pada proses penanganan zat radioaktif yang dipancarkan selama operasi dan adanya limbah radioaktif nya. Upaya perlindungan dari zat radioaktif yang dihasilkan tidak membahayakan pekerja maupun masyarakat disekitar lingkungan reaktor. Untuk hal tersebut sistem perlindungan biasanya digunakan sistem berlapis (*defense in depth*), salah satu diantara sistem berlapis itu adalah moderator. Bahan moderator merupakan lapisan kedua komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar. Posisi moderator yang demikian tersebut menyebabkan neutron hasil belah bahan bakar langsung berinteraksi dengan bahan moderator.

Dalam reaksi fisi, neutron yang dapat menyebabkan reaksi pembelahan adalah neutron thermal. Neutron tersebut memiliki energi sekitar 0,025 eV pada suhu 27° C. sementara neutron yang lahir dari reaksi pembelahan memiliki energi rata-rata 2 MeV, yang sangat jauh lebih besar dari energi thermalnya.

Syarat bahan moderator adalah atom dengan nomor massa kecil. Namun demikian syarat lain yang harus dipenuhi adalah: memiliki tampang lintang serapan neutron (kebolehan-jadian menyerap neutron) yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar dan memiliki daya hantara panas yang baik, serta tidak korosif.

Interaksi neutron hasil belah dengan bahan moderator akan memberikan pengaruh terhadap sifat bahan. Diantaranya bahan moderator akan mengalami perubahan sifat fisik, sifat nuklir, sifat mekanik maupun sifat kimianya. Perubahan yang terjadi terutama ditinjau dari sifat mekaniknya, khususnya logam memberikan efek yang dapat memperbaiki sifat material yang dikenai, diantaranya menaikkan

kekerasan dan kekuatan tariknya. Disamping itu interaksi tersebut juga mengakibatkan pengaruh yang kurang baik pada material bahan seperti penggetasan (*embrittlement*), efek pengelembungan (*swelling*) dan efek bertambahnya laju mulur (*creep rate*).

## II. SPESIFIKASI BAHAN MODERATOR

Dalam suatu instalasi reaktor yang sedang beroperasi akan terdapat berbagai macam radiasi diantaranya partikel  $\alpha$ ,  $\beta$ , fragmen (produk) pembelahan, proton, sinar  $\gamma$  dan neutron. Radiasi yang sangat tinggi dan temperatur yang sangat tinggi didalam teras reaktor bisa mencapai orde 1200° C, akan dapat mengubah sifat-sifat fisik, mekanik, dan kimia dari material sekitarnya. Efek radiasi pada material bervariasi tergantung dari jenis radiasi, energy serta *fluent* dari neutron. Sebagai contoh jenis radiasi  $\alpha$  dan  $\beta$  akan mengakibatkan kejadian ionisasi dan eksitasi elektron pada material yang terkena radiasi. Efek ini akan menyebabkan sedikit perubahan permanen pada material, yang secara makro perubahan yang kecil tersebut tidak begitu terasa akibatnya. Adapun partikel-partikel lain yang lebih berat seperti  $\alpha$ ,  $p$ ,  $n$  dan hasil belah produk fisi akan mengakibatkan perubahan yang sangat berarti pada perubahan sifat material sasaran, baik itu sifat fisik, mekanik maupun kimia.

Keberadaan berbagai macam radiasi harus diperhitungkan dalam pemilihan bahan yang akan digunakan didalam suatu lingkungan instalasi nuklir. Jadi ada dua syarat yang harus dipertimbangkan sebagai calon bahan material nuklir, yaitu syarat-syarat dibidang keteknikan umumnya dan syarat sebagai bahan nuklir. Ukuran dari syarat bahan nuklir tersebut biasanya disajikan dalam suatu pengertian tampang lintang (*cross section*). Pengertian dari tampang lintang tersebut adalah kebolehan-jadian untuk terjadinya suatu reaksi, baik itu reaksi serapan, hamburan, ataupun reaksi tangkapan. Pemilihan syarat

nuklir tersebut tergantung dimana lokasi material yang akan digunakan pada instalasi reaktor nuklir. Hal tersebut harus memenuhi dua syarat, yaitu nuklir dan non nuklir, sehingga material tersebut tetap mampu menjaga integritas dengan lingkungan sekitar sepanjang masa dipakai. Berdasarkan pada hasil pemilihan material yang memenuhi persyaratan sebagai material nuklir baik itu syarat nuklir maupun syarat non nuklir, hingga kini jenis-jenis material yang sering digunakan sebagai moderator adalah unsure H, D, He, Be, U, H<sub>2</sub>O dan D<sub>2</sub>O. Pemilihan jenis bahan moderator yang akan digunakan tergantung dari jenis reaktor yang akan didisain, sebagai contoh pada reaktor dengan pendingin air berat (HWR, Heavy Water Reactor) digunakan bahan moderator D<sub>2</sub>O dan pada reaktor dengan pendingin air ringan (LWR, Light Water Reactor) menggunakan bahan moderator H<sub>2</sub>O, serta pada reaktor yang beroperasi dengan temperatur tinggi (HTR, High Temperature Reactor) digunakan bahan moderator dari karbon.

Adapun hasil perhitungan dalam penelitian telah ditabelkan untuk bermacam-macam moderator beserta sifatnya disajikan pada tabel 1.

Tabel 1.

unsur	A	a	ε	Jumlah tumbukan dari 2 Mev ev	Slowing Down Power εΣs	Moderating Ratio εΣs/a
H	1	0	1.000	13		
D	2	0,111	0,725	25		
He	4	0,360	0,425	43	10 <sup>5</sup>	45
Be	9	0,640	0,206	86	0,16	130
C	12	0,716	0,158	114	0,065	200
U	238					
H <sub>2</sub> O					1,28	
D <sub>2</sub> O					0,18	

Dimana ε merupakan harga rata-rata dari selisih logaritma energi petumbukan.

Dari tabel 1 dilihat bahwa harga ε yang besar akan memberikan

indikasi sebagai moderator yang baik. Tetapi ε besar akan percuma bila Σs moderator yang dipakai mempunyai harga kecil. Maka nilai ε Σs (*Slowly Down Power*) biasanya akan memberi petunjuk yang paling baik mengenai tentang derajat kemampuan suatu moderator dalam menurunkan energi neutron, diberikan oleh suatu besaran Σs/ Σa (*moderating ratio*), karena didalam moderator neutron mengalami dua kemungkinan interaksi yaitu hamburan dan serapan. Sebagai contoh dapat dikemukakan walaupun ε dari H lebih besar D, tetapi dalam H<sub>2</sub>O dan D<sub>2</sub>O dimana kemungkinan serapan mulai berlangsung, jelas D<sub>2</sub>O merupakan jauh lebih baik dari air.

Sedangkan untuk syarat non nuklir adalah harus mempunyai konduktivitas panas yang baik, modulus elastisitas sekecil mungkin, koefisiensi ekspansi panas yang kecil serta mempunyai tingkat keradioaktifan imbas (*thermal irradiation induce stress*) sekecil mungkin.

### III. SIFAT BAHAN-BAHAN MODERATOR

Bahwa neutron yang dilepas oleh fisi mempunyai energi kinetik yang relative sangat tinggi (sekitar 2 Mev) dan dengan kecepatan yang sangat tinggi. Agar neutron dapat menyebabkan fisi yang berikutnya lagi, maka energinya harus harus dikurangi sampai mencapai energi termis (0,025 Mev). Untuk memperlambat neutron cepat sampai mencapai tingkat energi yang lebih rendah, neutron yang berenergi tinggi itu ditumbukan pada atom-atom yang terdapat dalam bahan tertentu yang disebut moderator. Bahan-bahan moderator reflektor yang sering digunakan antara lain graphit, beryllium, beryllium oxide, H<sub>2</sub>O dan D<sub>2</sub>O, yang mana mempunyai sifat-sifat sebagai berikut;

#### 1. Grafit.

Grafit adalah satu bahan dan material yang telah banyak digunakan secara luas untuk moderator dan reflektor. Sifat grafit masih kurang baik jika

disbanding dengan air berat ( $D_2O$ ) atau *beryllium* tetapi mudah diperoleh dengan tingkat kemurnian dan harga yang murah. Bahan ini mempunyai sifat yang lunak, *alltropic* (arah kristal nya sama dalam bentuk karbon), stabil pada semua temperatur pada tekanan atmosfer Tetapi grafit akan menyublim pada temperatur  $3650\text{ }^\circ\text{C}$  dan mempunyai bentuk kristal yang *hexagonal symmetry*. Tingkat *density* dari grafit secara teori besarnya  $2,26 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$ , sedangkan untuk persyaratan material komponen reaktor tingkat densitinya diantara  $1,6-1,7 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$ . Pada temperatur diatas  $2500\text{ }^\circ\text{C}$  sifat-sifat mekanik untuk kekuatan tariknya turun secara cepat, sehingga sifat mekaniknya turun secara total. Sifat-sifat grafit untuk komponen reaktor pada temperatur kamar dapat dilihat pada tabel.2. Sifat-sifat grafit untuk material reaktor nuklir.

Sifat	Longitudinal	Transverse
1 Koefisiensi muai panas/(per $^\circ\text{C}$ )	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
2 Konduktifitas panas (w/m.k)	188	130
3 Kekuatan tarik (Mpa)	9,0	4,8
4. Flexural strength (Mpa)	21	21
5 Compressive strength (Mpa)	34	34
6. Modulus Elastisitas (Gpa)	10	7,6

Pada temperatur dibawah  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  perubahan sifat laju mundur (*creep*) pada bahan grafit sangat kecil. Bahan tersebut juga memiliki sifat ketahanan terhadap *thermal shock*.

Karbon sebagai unsur penyusun grafit, memiliki ikatan kovalen dengan keadaan halic anti paralel. Selain itu, carbon juga memiliki ikatan campuran (tunggal dan ganda) dalam keadaan dinamis. Karena sifat tersebut di atas grafit memiliki kestabilan bahan yang tinggi. Bahan grafit yang telah diproses menjadi *impermeable graphite* atau *pyrolitic carbon* telah digunakan sebagai bahan moderator dan reflektor pada reaktor temperatur tinggi. Sifat intrinsik bahan ini sangat mendukung untuk persyaratan sebagai komponen moderator dan reflektor reaktor termal pada temperatur tinggi. Sifat-sifat tersebut antara lain: tampang lintang

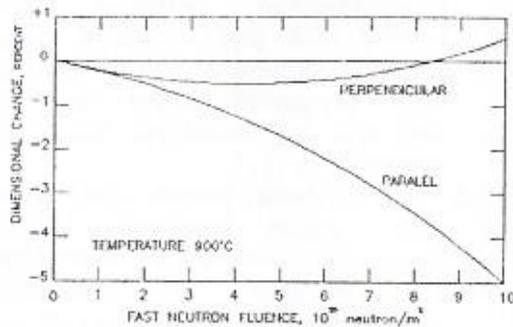
absorpsi neutron relatif rendah ( $\sigma_a=0,0853$  barns), tampang lintang hamburan neutron tinggi ( $\sigma_s = 4.800$  barns), kekuatan mekanik yang baik pada temperatur tinggi ( $\sigma_u = 140\text{ kg/cm}^2$ ) dan sifat termal yang baik pada temperatur tinggi. Pemakaian bahan grafit sebagai moderator dan reflektor sangat mendukung pengoptimalan pendayagunaan Reaktor temperatur tinggi.

#### Efek radiasi

Interaksi antara neutron hasil belah dengan materi akan memberikan pengaruh terhadap sifat-sifat bahan diantaranya sifat fisik, sifat nuklir, sifat mekanik, maupun sifat kimianya. Perubahan perubahan yang terjadi terutama ditinjau dari sifat mekaniknya, khususnya logam dapat memberikan efek yang dapat memperbaiki sifat material yang dikenainya, diantaranya menaikkan kekerasan, keuletan, dan kekuatan tariknya. Disamping itu inter aksi tersebut juga mengakibatkan pengaruh yang kurang baik pada material bahan seperti penggetasan (*embrittlement*), efek penggelembungan (*swelling*) dan efek bertambahnya laju mulur (*creep rate*).

Berdasarkan parameter yang mempengaruhi tingkat kerusakan material yang diiradiasi neutron ialah energi dan masa neutron, nomor atom target, fluks neutron dan lamanya proses irradiasi. Dengan demikian maka dalam menentukan material komponen reaktor harus memenuhi persyaratan mengenai perubahan dimensi, perubahan konduktifitas panas dan kemampuan menyimpan energi (*storage energy*). Proses irradiasi dibawah temperatur  $300\text{ }^\circ\text{C}$  akan merubah panjang material dalam arah tegak lurus sumbu (*extrusion axis*). Tetapi terjadi pengurangan arah sejajar pada extrusi. Pada temperatur lebih tinggi diatas  $300\text{ }^\circ\text{C}$  kekuatan grafit menyusut pada kekuatan asal. Tetapi temperatur  $900\text{ }^\circ\text{C}$  diharapkan penyusutan grafit dalam arah tegak lurus mencapai minimum (pada *fluent neutron* rendah) dan penggelembungan selaras dengan perubahan *fluent*.

Pada arah paralel ( $400^{\circ}\text{C}$ ) kontraksi berubah secara konstan (tetap) selaras dengan besar *fluent*. Dan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar. 1.



Gambar 1. Grafik perubahan dari material graphit yang diiradiasi neutron.

Konduktifitas panas untuk grafit waktu diiradiasi berkurang atau menurun akibat dari perubahan temperatur. Untuk mengurangi efek radiasi pada temperatur lebih rendah ( $900^{\circ}\text{C}$ ) dapat dilakukan dengan cara aniling. Proses aniling dapat dilakukan pada temperatur  $1500^{\circ}\text{C}$  selama 10 jam.

#### 2. Pyrolytic Carbon.

*Pyrolytic Carbon* dapat diproduksi dengan cara mendeposisikan dengan gas *hydrocarbon*, misalnya methane, propane, acetylen dan lainnya. Proses deposisi dilakukan pada temperatur  $1400^{\circ}\text{C}$  -  $2500^{\circ}\text{C}$ . Tujuan utamanya ialah untuk mengukung produk fisi (berupa gas padatan) agar tidak menyebar kemana-mana.

#### 3. Beryllium dan beryllium oxide.

*Beryllium* dan *beryllium oxide* juga merupakan jenis bahan yang dapat berfungsi sebagai moderator. Sifat-sifat Bahan ini lebih baik jika dibanding dengan sifat-sifat bahan dari grafit. Dalam bentuk oksida dan karbida akan sangat berguna untuk reaktor termis dimana *beryllium* dan *beryllium oxide* tersebut berfungsi sebagai reflektor. Akan tetapi harganya sangat mahal dan mempunyai sifat mekanik yang kurang baik. Titik didih dari *beryllium*

dalam bentuk logam sekitar temperatur  $1280^{\circ}\text{C}$ . Bentuk geometri dari struktur kristalnya adalah *hexagonal*. Dari struktur kristalnya dalam sifat bentuk fisik dan mekanik memberikan arah *anisotropic*.

Adapun sifat-sifat mekanik dari bahan *beryllium* ini mempunyai kekuatan luluh (*yield strength*) pada 270 Mpa, sedangkan kekuatan tariknya 410 Mpa pada tekanan *atmosphere*, perubahan perpanjangan sangat kecil dan mempunyai tingkat kegetasan yang kurang baik. *Beryllium* dalam bentuk keramik mempunyai titik lebur (*melting point*) mencapai  $2550^{\circ}\text{C}$ , konduktifitas panas sangat tinggi pada temperatur dan tekanan *atmosphere* dan kan berkurang tingkat konduktifitasnya dengan naiknya temperatur.

#### 4. Air ringan ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Air ringan dapat dipergunakan sebagai moderator, disamping harganya murah dan mempunyai daya penyerapan (*Slowing down power*) yang sangat baik dan panjang imigrasinya kecil untuk *neutron thermal*. Serta mempunyai tampang lintang (*cross section*) tangkapan tinggi terhadap *neutron thermal*. Tipe reaktor pembangkit daya lainnya yang cukup terkenal adalah Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor, LWR*) yang menggunakan air ringan (air biasa) sebagai bahan untuk memoderasi neutron sekaligus berlaku sebagai pendingin reaktor.

#### 5. Air berat ( $\text{D}_2\text{O}$ ).

Air berat adalah suatu bahan yang dapat berfungsi sebagai moderator, disebabkan mempunyai sifat-sifat antara lain mempunyai *slowing down power* sangat baik dan tampang lintang (*cross section*) tangkapan yang tinggi. Dengan menggunakan air berat sebagai moderator akan mempunyai keuntungan dimana dapat dioperasikan dengan bahan uranium alam dan dengan demikian uranium yang diperkaya tidak diperlukan lagi. Air berat ini selama penyinaran radiasi unsur-unsur yang dilepaskan ialah unsur H dan gas  $\text{O}_2$ .

Reaktor Air Berat atau HWR (*Heavy Water Reactor*) Reaktor Air Berat merupakan jenis reaktor yang menggunakan D<sub>2</sub>O sebagai moderator sekaligus pendingin. Reaktor ini menggunakan bahan bakar Uranium alam sehingga harus digunakan Air Berat. Untuk reaktor air berat, walaupun tidak menggunakan air berat sebagai pendingin asalkan digunakan air berat sebagai moderator maka disebut HWR.

#### KESIMPULAN

1. Syarat untuk menentukan bahan moderator (dan reflektor) adalah:
  - a) Pada tiap tumbukan terdapat kehilangan energi neutron yang besar.
  - b) Penampang penyerapan yang rendah.
  - c) Penampang penghamburan yang tinggi.
2. Pemilihan jenis bahan moderator yang akan digunakan tergantung dari jenis reaktor yang akan didisain, sebagai contoh:
  - a) D<sub>2</sub>O digunakan pada reaktor dengan pendingin air berat (*HWR, Heavy Water Reactor*)
  - b) H<sub>2</sub>O digunakan pada reaktor dengan pendingin air ringan (*LWR, Light Water Reactor*)
  - c) Grafit digunakan pada reaktor yang beroperasi dengan temperatur tinggi (*HTR, High Temperature Reactor*)
3. Bahan-bahan yang dipergunakan sebagai moderator adalah: grafit, *Pyrolytic carbon*, *Beryllium* dan *Beryllium oxide*, H<sub>2</sub>O, dan D<sub>2</sub>O.
4. Dari tabel 1 dilihat bahwa harga  $\epsilon$  yang besar akan memberikan indikasi sebagai moderator yang baik, tetapi  $\epsilon$  besar akan percuma bila  $\Sigma_s$  moderator yang dipakai mempunyai harga kecil. Maka nilai  $\epsilon \Sigma_s$  (*Slowly Down Power*) biasanya akan memberi petunjuk yang paling baik mengenai tentang derajat kemampuan suatu moderator dalam menurunkan energi neutron, diberikan oleh suatu besaran  $\Sigma_s / \Sigma_a$  (*moderating ratio*),

karena didalam moderator neutron mengalami dua kemungkinan interaksi yaitu hamburan dan serapan.

5. Interaksi neutron hasil belah dengan bahan moderator akan mengakibatkan pengaruh yang kurang baik pada material bahan seperti penggetasan (*embrittlement*), efek penggelembungan (*swelling*) dan efek bertambahnya laju mulur (*creep rate*).
6. D<sub>2</sub>O (air berat) adalah suatu bahan yang dapat berfungsi sebagai moderator, disebabkan mempunyai sifat-sifat antara lain mempunyai *slowing down power* sangat baik dan tampang lintang (*cross section*) tangkapan yang tinggi. Sebagai moderator air berat akan mempunyai keuntungan dapat dioperasikan dengan bahan uranium alam dan dengan demikian uranium yang diperkaya tidak diperlukan lagi

#### DAFTAR PUSTAKA

1. SAMUEL GLASSTON; ALEXANDER SESONKO; "*Nuclear Reactor Engineering*"; Third Edition, 1998.
2. BENYAMIN, Mm, MA ; "*Nuclear Reactor Material and Application*", VNR, Comp, 1983.
3. SUTARYO SUPADI, MSc; "*Fisika Reaktor*"; "*Dasar-dasar Ilmu Logam, Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*", BATAN, Jakarta, 1986.
4. <http://www.infonuklir.com>
5. TUMPAL PANDIANGAN; SUWOTO; AS NATIO LASMAN; "*Studi Bahan Grafit sebagai Moderator dan Reflektor pada Reaktor Temperatur Tinggi*" Prosiding Seminar Nasional ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, BATAN, 2002.
6. <http://old.nabble.com/Seri-815-Pengayaan-Air-Berat-untuk-Apa--p15524840.html>
7. <http://ansn.bapeten.go.id>