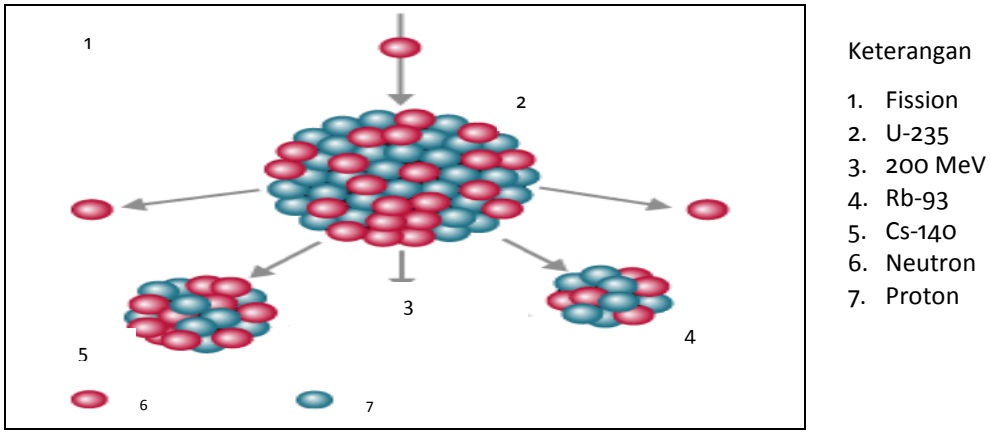
# II. TINJAUAN PUSTAKA

## A. Energi Nuklir

Energi nuklir merupakan salah satu energi alternatif atas masalah yang ditimbulkan oleh semakin berkurangnya sumber energi fosil serta dampak lingkungan yang ditimbulkannya (Pranoto, 2009). Energi nuklir termasuk salah satu energi bersih masa depan, karena tidak menghasilkan emisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua macam mekanisme yaitu pembelahan inti (reaksi fisi) dan penggabungan beberapa inti (reaksi fusi) (Konin, 2008). Mekanisme produksi energi nuklir banyak menggunakan reaksi fisi nuklir. Reaksi fisi dapat dilihat pada Gambar 1.



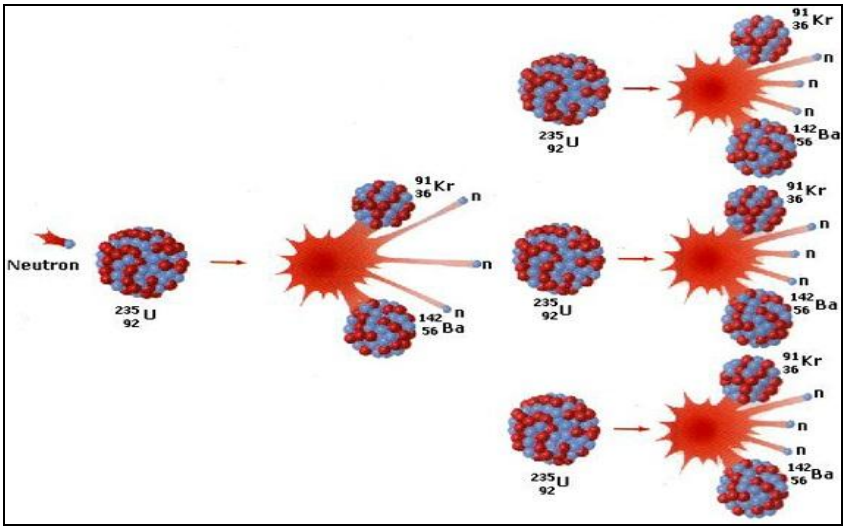

Gambar 1. Reaksi fisi (Net Sains, 2009).

Sebuah inti berat ditumbuk oleh partikel (neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Mekanisme ini disebut

pembelahan inti (fisi nuklir) (Kidd, 2009). Contoh reaksi fisi adalah inti uranium yang ditumbuk oleh neutron. Saat sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron dengan presentasi tertentu, inti akan mengalami pembelahan atau reaksi fisi (Zweifel, 1973). Berikut salah satu contoh reaksi fisi dari uranium dapat dilihat pada persamaan (1).

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n \qquad (1) $$

Reaksi fisi uranium seperti di atas menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk reaksi fisi selanjutnya (Cothern dan Rebers, 1991). Mekanisme ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi berantai tak terkendali. Akibatnya terjadi pelepasan energi yang besar secara singkat. Pelepasan energi yang dihasilkan melalui reaksi fisi berantai dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik apabila reaksi fisi berantai ini terkendali (Zweifel, 1973). Reaksi fisi berantai dapat dilihat pada Gambar 2.




Gambar 2. Reaksi fisi berantai (Net Sains, 2009).

## B. Reaktor Nuklir

Keberadaan reaktor nuklir saat ini didahului dengan penemuan neutron pada tahun 1932, karena neutron mempunyai pengaruh terjadinya proses reaksi nuklir. Tahun 1938, beberapa orang ilmuan yaitu Lise Meitner, Fritz Strassman dan Otto Hahn membuat reaktor nuklir sebagai tempat terjadinya reaksi nuklir pada bahan uranium. Pada akhir tahun 1942, reaktor nuklir pertama dibangun di *University of Chicago* (Khusyairi, 2012).

Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi. Pada reaktor ini berlangsung reaksi fisi berantai terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop dan nuklida baru (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Terkendali yang dimaksud dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi. Sedangkan reaksi fisi kontinu harus terjadi dalam uranium alam, yang mengandung bahan fisil U-235 (0,7%). Neutron dalam reaktor nuklir digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti. Reaksi fisi ini nantinya akan menghasilkan inti ringan, neutron dan energi sebesar 200 MeV.

Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).

Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir terkendali di dalam sebuah reaktor nuklir berupa energi panas. Energi panas ini dapat menguapkan air sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemutar turbin dan membangkitkan listrik.

Berdasarkan energi yang digunakan untuk mempertahankan reaksi fisi berantai, reaktor nuklir dibagi menjadi dua macam yaitu:

1. Reaktor lambat (*thermal*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron lambat. Hal ini ditandai oleh adanya moderator yang digunakan untuk menurunkan kecepatan neutron dan menurunkan energi kinetiknya.
2. Reaktor cepat (*fast*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron cepat. Hal ini ditandai dengan adanya pengurangan bahan moderator (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Perkembangan reaktor nuklir terjadi beberapa generasi. Reaktor generasi I dikembangkan pada tahun 1950-1960. Sebagian besar reaktor generasi I ini menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar dan grafit sebagai moderator. Reaktor generasi II menggunakan bahan bakar uranium yang telah diperkaya dan sebagian besar didinginkan serta dimoderatori oleh air. Reaktor generasi III adalah reaktor lanjutan dari beberapa reaktor generasi I yang beroperasi di Jepang dan perkembangan dari reaktor generasi II (World Nuclear, 2012).

Reaktor generasi IV berbeda dengan reaktor I, II dan III karena reaktor ini dirancang tidak hanya untuk memasok daya listrik tapi juga untuk memasok energi termal. Pada reaktor generasi IV, terdapat enam tipe reaktor yaitu (Rooijen, 2006):

1. *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR)

2. *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR)

3. *Molten Salt Reactor* (MSR)

4. *Sodium Cooled Fast Reactor* (SFR)

5. SCWR

6. *Very High Temperature Reactor* (VHTR) (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

## C. Komponen Dasar Reaktor Nuklir

Komponen dasar reaktor nuklir merupakan komponen yang harus ada pada sebuah reaktor nuklir untuk mengendalikan laju pembelahan (reaksi fisi). Adapun komponen dasar dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut.

a. Bahan bakar (*fuel*)

Bahan bakar merupakan sumber energi nuklir. Ada dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron sedangkan bahan fertil adalah unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron tetapi akan membentuk bahan fisil. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah uranium-233, uranium-235, plutonium-239 dan thorium-232 (Benedict et al., 1981).

b. Moderator

Moderator merupakan lapisan kedua komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar. Moderator berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (200 MeV) menjadi energi neutron lambat (0,02 – 0,04 eV). Sehingga neutron dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya.

Syarat bahan moderator adalah atom dengan nomor massa kecil, memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar, sesuai jenis reaktor yang akan didesain dan memiliki daya hantar panas yang baik serta tidak korosif misalnya adalah H, D, He, Be, U, $H_2O$, grafit dan air berat ($D_2O$).

c. Batang kendali (*control rod*)

Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi untuk mengontrol keluaran daya dari sebuah reaktor dengan cara mengendalikan jumlah neutron yang dihasilkannya. Jika neutron yang dihasilkan selalu konstan dari waktu ke waktu (faktor multiplikasinya bernilai 1), maka reaktor dikatakan berada pada kondisi kritis. Sebuah reaktor normal bekerja pada kondisi kritis. Pada kondisi ini reaktor menghasilkan keluaran daya yang stabil. Jika neutron yang dihasilkan semakin berkurang (multiplikasinya kurang dari 1), maka reaktor dikatakan berada pada kondisi *subcritis* dan daya yang dihasilkan semakin menurun. Sebaliknya jika netron yang dihasilkan meningkat (multiplikasinya lebih besar dari 1), reaktor dikatakan dalam keadaan *supercritis.*

Selama kondisi superkritis, daya yang dibebaskan oleh sebuah reaktor meningkat. Jika kondisi ini tidak dikendalikan, meningkatnya daya dapat mengakibatkan mencairkan sebagian atau seluruh teras reaktor, dan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan sekitar. Kendali ini dilakukan oleh sejumlah batang kendali yang dapat bergerak keluar-masuk teras reaktor.

Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron (B) dan cadmium (Cd). Jika reaktor menjadi *supercritis*, batang kendali secara otomatis bergerak masuk lebih dalam ke dalam teras reaktor untuk menyerap kelebihan neutron yang menyebabkan kondisi itu kembali ke kondisi kritis.

Sebaliknya, jika reaktor menjadi *subcritis*, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga lebih sedikit netron yang diserap. Dengan demikian, lebih banyak neutron yang tersedia untuk reaksi fisi dan reaktor kembali ke kondisi kritis. Untuk menghentikan operasi reaktor (misal untuk perawatan), batang kendali turun penuh sehingga seluruh netron diserap dan reaksi fisi berhenti.

d. Perisai (*shieling*)

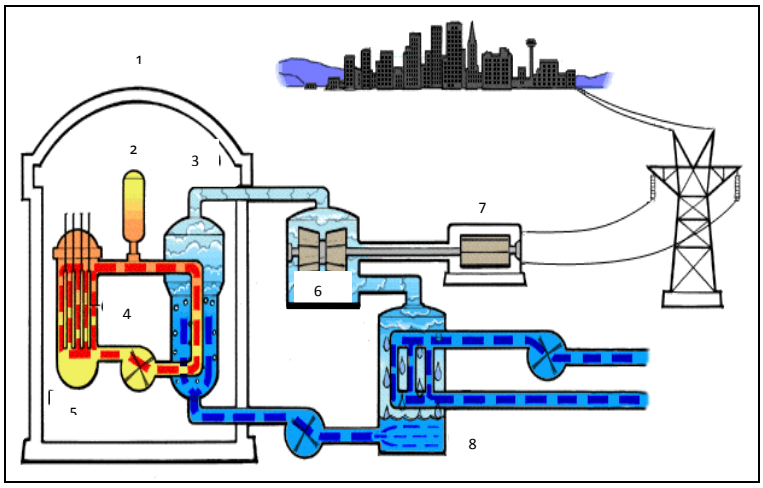
Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Untuk menahan radiasi agar tidak menyebar ke lingkungan luar sistem reaktor maka diperlukan suatu sistem perisai. Pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (Lewis, 2008).

## D. Jenis-Jenis Reaktor

Jenis reaktor nuklir yang cukup terkenal dan telah dikembangkan oleh beberapa negara adalah reaktor air bertekanan (*Pressure Water Reactor/*PWR), reaktor air mendidih (*Boilling Water Reactor/*BWR) (Roulstone, 2011) dan jenis terbaru yang sedang dikembangkan yaitu reaktor air superkritis (SCWR) (Buongiorno, 2003).

a. PWR

PWR merupakan salah satu jenis reaktor air ringan dan banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Reaktor ini menggunakan teknik fisi nuklir dalam memanaskan air di bawah tekanan tinggi di dalam reaktor yang kemudian dilewatkan alat penukar panas *(steam generator)* sehingga dihasilkan uap untuk menggerakkan turbin dan seterusnya generator listrik (Driscoll dan Heizler, 2005). Reaktor jenis PWR memiliki efisiensi termal yang rendah sekitar 33%, PWR beroperasi pada tekanan 16 M Pa dengan temperatur rata-rata 280-290$^{o}$C. Skematik reaktor jenis PWR ditunjukan pada Gambar 3.



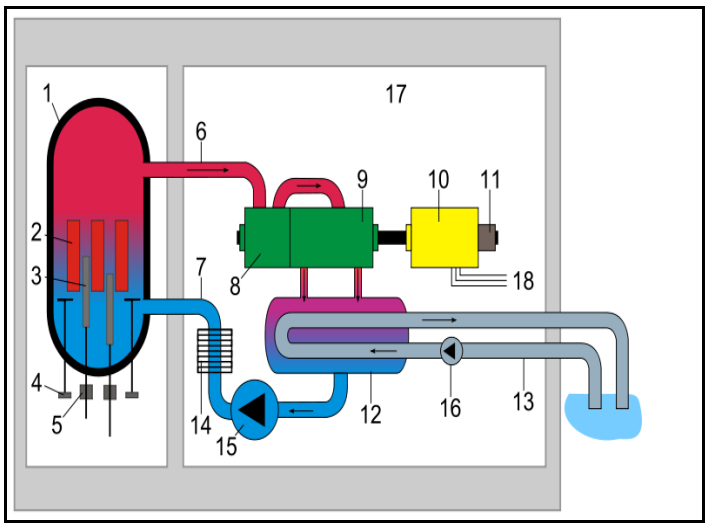

Keterangan
1. *Containment Structure*
2. *Preassurizer*
3. *Steam Generator*
4. *Control Rods*
5. *Reactor Vessel*
6. *Turbine*
7. *Generator*
8. *Condenser*

Gambar 3. Skematik reaktor jenis PWR (Buongiorno, 2003).

Reaktor jenis ini banyak digunakan di Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Spanyol, Rusia, dan China. Bahan bakar reaktor ini adalah 3% uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan *zircoloy* sedangkan batang kendali (*control rods*) dioperasikan dari bagian atas reaktor, penggatian bahan bakar dilakukan setiap 3 tahun sekali (Roulstone, 2011).

b. BWR

Reaktor jenis BWR beroperasi pada tekanan 7,3 M Pa dengan temperatur rata-rata 310 $^{o}$C. Bahan bakar reaktor ini adalah 3% Uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan *zircoloy* sedangkan batang kendali (*control rods*) dioperasikan dari bagian bawah reaktor sehingga tidak jatuh ke inti dan menghentikan reaktor, penggatian bahan bakar dilakukan setiap 2 tahun sekali. Pendingin pada reaktor jenis ini terjadi secara alami. Reaktor jenis ini banyak digunakan di Amerika Serikat, Swedia dan Jepang (Roulstone, 2011). Skematik reaktor jenis BWR ditunjukan pada Gambar 4.




Keterangan
1. *Reactor Vessel*
2. *Fuel core element*
3. *Control rod element*
4. *Circulation pumps*
5. *Control rod motors*
6. *Steam*
7. *Inlet circulation water*
8. *High pressure turbine*
9. *Low pressure turbine*
10. *Electric generator*
11. *Electric generator exciter*
12. *Steam condenser*
13. *Cold water for condenser*
14. *Pre-warmer*
15. *Water circulation pump*
16. *Condenser chamber*
17. *Concrete chumber*
18. *Connection to electricity grid*

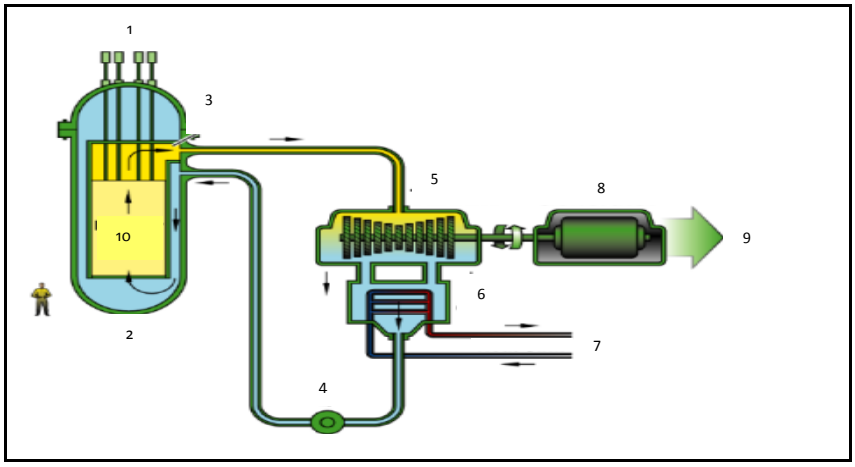
Gambar 4. Skematik reaktor jenis BWR (Buongiorno, 2003).

c. SCWR

Reaktor jenis SCWR merupakan salah satu jenis reaktor generasi IV yang disebut sebagai reaktor masa depan (Oka, 2010) dan merupakan jenis reaktor air ringan (Reiss et al., 2010). Reaktor ini bekerja di atas titik kritis air (Buongiorno, 2003), dimana SCWR beroperasi pada tekanan 25 M Pa (Oka et al., 2003). Air sebagai pendingin dan moderator memiliki titik kritis sebesar 22,1 M Pa. Pada tekanan

tersebut jika temperatur air terus dinaikkan maka tidak akan terjadi perubahan fasa sehingga entropi reaktor dan efisiensi panas lebih besar (Sriyono, 2008).

Pada keadaan *subcritis*, kondisi air mendidih pada temperatur tertentu dan pada keadaan *supercritis* air mengalami *pseudo-critical* pada temperatur 385$^{o}$C dan tekanan 25 M Pa. Pada temperatur dan tekanan tersebut air memiliki kapasitas panas yang lebih tinggi sehingga disebut keadaan efisiensi paling tinggi (Oka, 2010). Efisiensi SCWR dapat ditingkatkan selongsong bahan bakar yang mampu menahan suhu tinggi (Tsiklauri et al., 2004). Skematik reaktor jenis SCWR ditunjukan pada Gambar 5.




Keterangan
1. *Control rods*
2. *Reactor*
3. *Supercritical water*
4. *Pumps*
5. *Turbine*
6. *Condenser*
7. *Heat sink*
8. *Generator*
9. *Electrical power*
10. *Reactor core*

Gambar 5. Skematik reaktor jenis SCWR (Buongiorno, 2003).

Desain SCWR mampu menghasilkan efisiensi termal yang tinggi dengan konfigurasi sistem yang sederhana. Namun, disisi lain, SCWR masih harus mengembangkan desain inti yang layak, dapat memperkirakan koefisiensi perpindahan panas dan mengembangkan bahan-bahan untuk struktur bahan bakar dan inti yang tahan korosi dalam mempertahankan keadaan *supercritis* (Shan et al., 2009).

## E. Bahan Bakar Reaktor

Bahan bakar reaktor yang digunakan sebagai sumber energi nuklir adalah bahan bakar yang bersifat fisil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung membelah apabila menangkap neutron. Adapun bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir yaitu uranium dan thorium (Kidd, 2009).

### a. Uranium

Martin Klaproth adalah seorang kimiawan Jerman yang pertama kali menemukan uranium pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami, memiliki titik leleh yaitu 1132 $^{o}$C dan tergolong sebagai logam putih keperakan. Simbol kimia uranium adalah U (Cothern dan Rebers, 1991). Uranium memiliki nomor atom 92, proton 92, elektron 92 dan elektron valensi 6. Inti uranium mengikat 141 sampai 146 neutron.

Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235 (0,720%) dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009). Sedangkan uranium-238 bersifat fertil, namun dapat pula bersifat fisil dengan cara ditransmutasi menjadi plutonium-239. Uranium yang terkandung dalam batuan *phosphate* diperkirakan 22 juta ton dan di air laut 4200 juta ton (Husna, 1998). Uranium merupakan sumber energi dengan kelimpahan yang sangat besar. Meski bukan termasuk energi yang terbarukan, uranium banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang kemudian dimanfaatkan untuk produksi senjata nuklir kemudian berkembang untuk pembangkit listrik.

b. Thorium

Jons Berzelius adalah seorang kimiawan Swedia yang menemukan thorium dalam bentuk kecil diantara batu dan tanah pada tahun 1828. Thorium adalah logam alami yang bersifat radioaktif dengan kelimpahan yang besar yaitu tiga kali lipat lebih banyak dari uranium. Pada keadaan murni thorium merupakan logam putih keperakan yang berkilau. Apabila terkontaminasi oksigen, thorium perlahan akan memudar di udara menjadi abu-abu kemudian hitam.

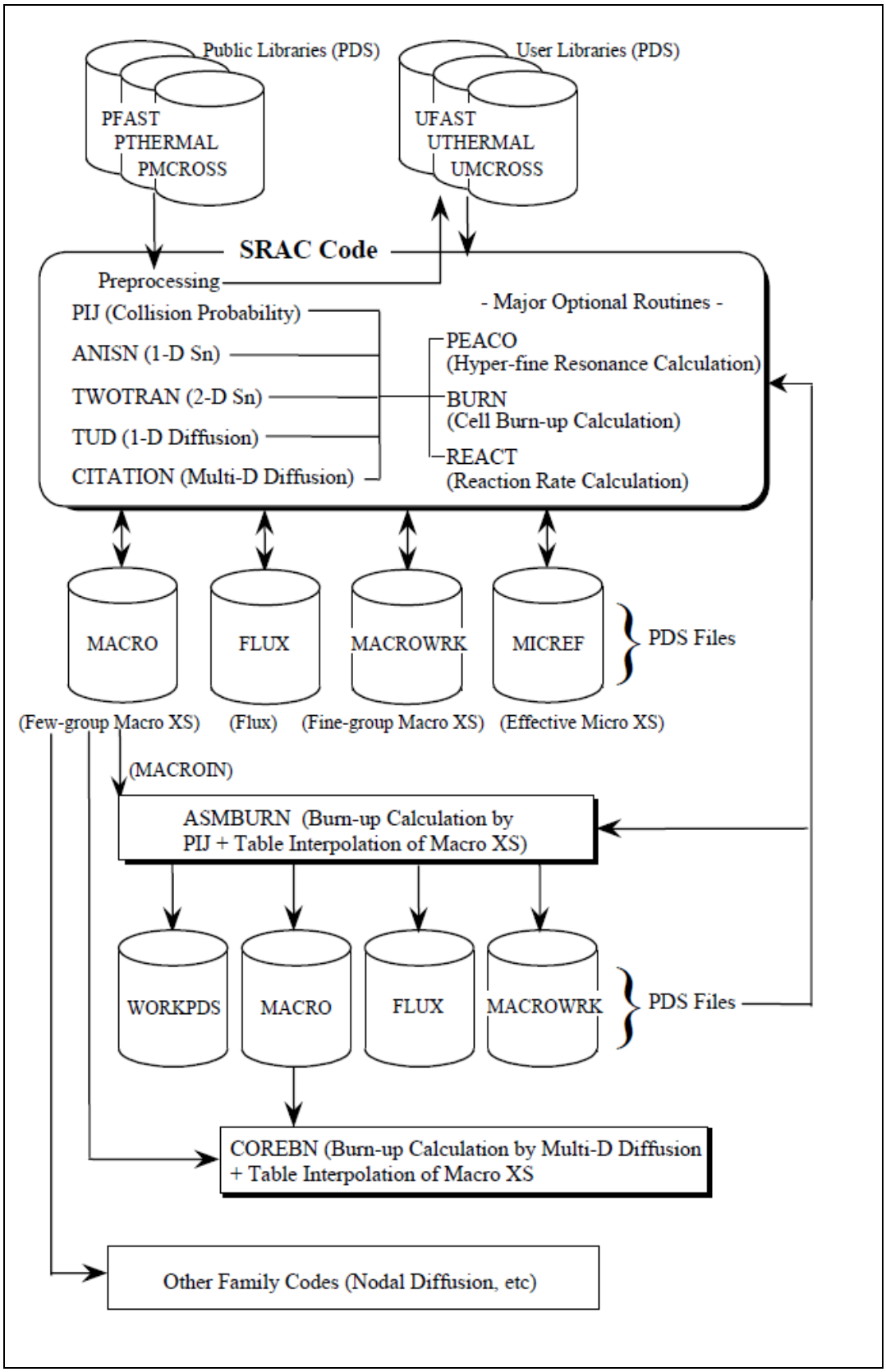
Thorium merupakan sumber energi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir meskipun tidak bersifat fisil (Kidd, 2009). Thorium yang bersifat fertil akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan uranium-233 yang besifat fisil. Uranium-233 menghasilkan jumlah energi yang sama dengan U-235 yaitu 200 M eV (Husna, 1998).

Penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir lebih murah, lebih ramah lingkungan dan lebih aman. Thorium lebih murah karena jumlah kelimpahannya yang banyak dibanding uranium. Bahan bakar thorium lebih ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas $CO_2$ dari sektor energi listrik (Wilson et al., 2008) serta memiliki limbah radioaktif yang lebih sedikit dari uranium. Thorium menghasilkan 0,5 kg plutonium sementara uranium menghasilkan 230 kg Plutonium dari reaktor dengan kapasitas 1 GWe selama satu tahun beroperasi (Kamei dan Hakami, 2010) dan lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok untuk produksi senjata nuklir (Wilson et al., 2008).

## F. SRAC

SRAC merupakan suatu sistem kode penghitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal (Okumura, 2002). SRAC mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency*/JAEA) (Okumura, 2007).

Sistem SRAC terdiri dari penyimpanan data (*Libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-IV, JEF-2.2 dan sebagainya), dan lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Struktur SRAC ditunjukan pada Gambar 6.




Gambar 6. Struktur SRAC (Okumura et al., 2006).

Sistem SRAC memiliki kode dasar yaitu sebagai berikut:

1. PIJ: Kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN: Kode transport satu dimensi ($S_N$) yang terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* ($X$), silinder ($R$) dan bola ($R_S$).
3. TWOTRAN: Kode transport dua dimensi ($S_N$) yang terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* ($X$-$Y$), silinder ($R$-$Z$) dan bola ($R$-$\theta$).
4. TUD: kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* ($X$), silinder ($R$) dan bola ($R_S$).
5. *CITATION*: kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan *hexagonal* (Okumura et al., 2002).

SRAC terdapat *file input* dan *file output*, *file Input* SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila *input* data pada SRAC telah selesai kemudian di *run* maka *file output* standar akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau tidak. Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti

==========END OF SRAC CALCULATION==========

maka harus dilakukan pengecekan pada *input* dan memeriksa *output* standar. Setelah penghitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura et al., 2002). *Input* pada SRAC dapat dilihat pada Gambar 7.

```
UO2F   ← Case name for UO2 cell calculation
Macro-XS for UO2 CELL BY PIJ   ← Comment for this case
1 1 1 1 2   1 4 3 -2 1   0 0 0 0 2   0 1 0 0 0   ← Option control
1.0E-3 / BUCKLING FOR P1/B1
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/pfast      Old       File
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/pthml      O         F
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs      O         F
/home/okumura/MyPDS/UFAST                  Scratch   Core
/home/okumura/MyPDS/UTHERMAL               S         C
/home/okumura/MyPDS/UMCROSS                S         C
/home/okumura/MyPDS/MACROWRK               S         C      } PDS file control
/home/okumura/MyPDS/MACRO                  New       C        (first case only)
/home/okumura/MyPDS/FLUX                   New       C
/home/okumura/MyPDS/MICREF                 S         C
60 30   3 1 / Fast(60g)+Thermal(30g) => Fast(3G)+Thermal(1G)
          :
          :     { Energy Group Structure }
          :
          :     { Geometry for PIJ }
          :
3 / Number of Materials
FUE1X01X  0 3  300.  0.84  0.0  / 1 : UO2 FUEL
XU050001  2 0  6.086E-4
XU080001  2 0  2.255E-2
XO060001  0 0  4.725E-2
CLADX02X  0 1  300.  0.11  0.0  / 2 : CLADDING      } material specification
XZRN0001  0 0  4.311E-2
MODEX031  0 2  300.  0.00  0.0  / 3 : MODERATOR
XH01H001  0 0  6.676E-2
XO060001  0 0  3.338E-2
          :
          :
MOXF   ← Case name for MOX cell calculation
Macro-XS for MOX CELL BY PIJ   ← Comment for this case
1 1 1 1 2   1 4 3 -2 1   0 0 0 0 2   0 1 0 0 0   ← Option control
1.0E-3 / BUCKLING FOR P1/B1
          :
          :     { Geometry for PIJ }
          :
          :     { material specification for MOX fuel }
          :
CORE   ← Case name for Core calculation
2-dimensional Core calculation by CITATION (4-group)   ← Comment for this case
0 0 0 1 0   0 0 0 0 1   0 5 0 0 2   0 1 0 0 0   ← Option control
1.0E-20 / dummy BUCKLING (not effective)
          :
          :
          :     { Control and Geometry data for CITATION }
          :
005
  1  1  1
  1  2  1   ← Zone map                                  } Input for CITATION
  1  1  1
          :
999

1 2  /  Material No. by Zone
2    / Number of Materials
UO2FA010 0  0  0.  0.  /   ← Homogenized X-section provided by the first case
MOXFA010 0  0  0.  0.  /   ← Homogenized X-section provided by the second case
     / End job   ← Blank case name to terminate job
```

Gambar 7. *Input* SRAC (Okumura et al., 2002).