

II. TINJAUAN PUSTAKA

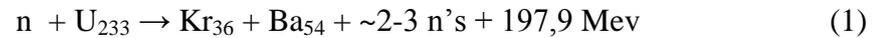
A. Konsep Dasar Reaktor

Secara umum, energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua macam mekanisme, yaitu pembelahan inti atau reaksi fisi dan penggabungan beberapa inti melalui reaksi fusi (Majalah Energi, 2010). Reaksi fisi atau pembelahan inti merupakan mekanisme yang banyak digunakan untuk menghasilkan energi nuklir melalui sebuah reaktor.

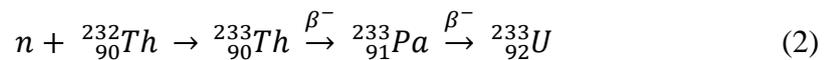
Sebuah reaktor bekerja berdasarkan reaksi pembelahan (fisi) dari sebuah inti. Pada reaktor dibedakan dua jenis material yang dapat mengalami fisi atau pembelahan yang disebut dengan *fissionable material* yaitu material fisil dan material fertil. Sebuah material fisil merupakan material yang akan mengalami pembelahan ketika ditembak oleh sebuah neutron dengan sejumlah energi, sedangkan material fertil adalah material yang akan menangkap neutron dan melalui peluruhan radioaktif akan berubah menjadi material fisil (Lewis, 2008). Uranium-235 adalah material yang secara alami bersifat fisil (Roulstone, 2011) dan uranium-238 adalah material fertil (Lewis, 2008).

Konsep dasar dari sebuah reaktor adalah reaksi fisi dari sebuah material misalnya Uranium. Ketika sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron,

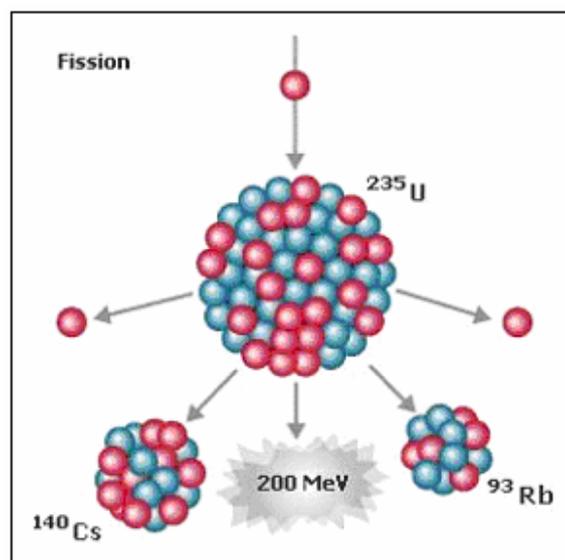
dengan persentase tertentu inti akan mengalami pembelahan (fisi) (Zweifel, 1973). Salah satu contoh reaksi fisi dari Uranium adalah sebagai berikut.



Sedangkan untuk Thorium-232, karena tidak bersifat fisil maka Thorium-232 akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat yang akan menghasilkan Uranium-233 bersifat fisil yang kemudian akan membelah ketika ditembak oleh neutron. Fisi dari Uranium-233 ini menghasilkan energi dengan jumlah yang sama dengan Uranium-235 yaitu sebesar 200 MeV (World Nuclear, 2012) Bentuk reaksi dari Thorium-232 menjadi Uranium-233 yaitu sebagai berikut.

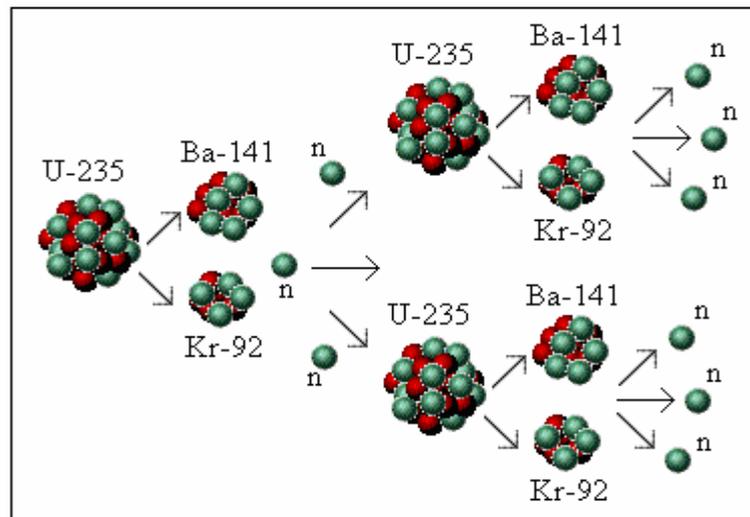


Salah satu contoh proses pembelahan (reaksi fisi) dari Uranium seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi Fisi (Pramuditya dan Waris, 2005)

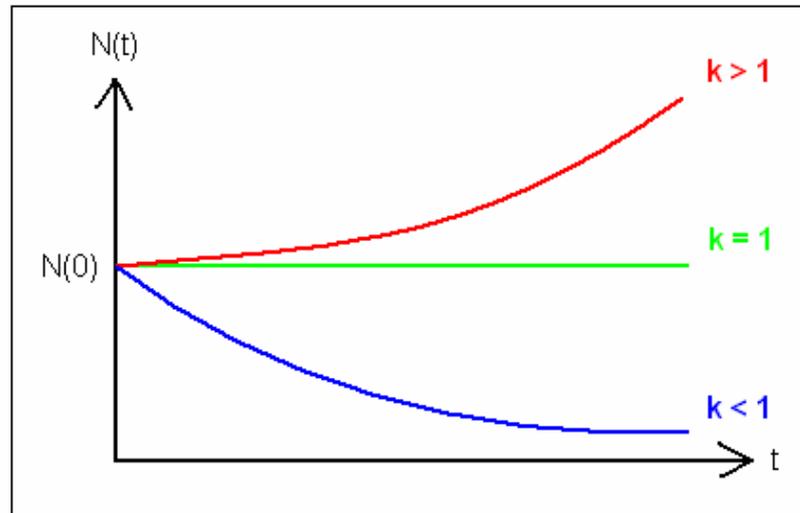
Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi, neutron dan produksi fisi semua berperan penting dalam reaktor nuklir (Lewis, 2008). Neutron yang dihasilkan dapat digunakan untuk menginduksi reaksi fisi lebih jauh lagi sehingga mendorong terjadinya reaksi fisi berantai. Reaksi berantai yang terjadi dalam reaksi fisi harus dibuat lebih terkendali. Usaha ini dapat dilakukan di dalam sebuah reaktor nuklir. Reaksi berantai terkendali dapat diusahakan berlangsung di dalam reaktor yang terjamin keamanannya dan energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk keperluan yang lebih berguna, misalnya untuk penelitian dan untuk membangkitkan listrik (Info Nuklir, 2010). Gambar 3 menunjukkan contoh terjadinya reaksi fisi berantai.



Gambar 3. Reaksi Fisi Berantai (Pramuditya dan Waris, 2005)

Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor mengakibatkan dihasilkan/hilangnya neutron dalam jumlah tertentu (Zweifel, 1973). Secara umum perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil (kritis)

dicapai jika nilai k -efektif = 1 (Pramuditya dan Waris, 2005). Gambar 4 menunjukkan tiga jenis keadaan teras reaktor berdasarkan faktor multiplikasinya.



Gambar 4. Faktor Multiplikasi (Pramuditya dan Waris, 2005)

Gambar 4 menunjukkan jika besarnya $k > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu, jika $k = 1$ reaktor dalam keadaan kritis artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi konstan (tetap), dan jika besarnya nilai $k < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu (Zweifel, 1973).

Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor harus dikendalikan agar perubahan jumlah neutron dibatasi sehingga hanya satu neutron saja yang akan diserap untuk pembelahan inti berikutnya. Dengan mekanisme ini, diperoleh reaksi berantai terkendali yang energi yang dihasilkannya dapat dimanfaatkan untuk keperluan yang berguna.

B. Reaktor Nuklir

Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi. Reaktor nuklir merupakan sebuah peralatan sebagai tempat berlangsungnya reaksi berantai fisi nuklir terkendali untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop, atau nuklida baru (Dunia Fisika, 2009). Dalam reaktor nuklir, neutron digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti pada inti berat. Reaksi fisi ini menghasilkan inti ringan (*fission product*), beberapa neutron dan energi sebesar 200 MeV (Deuderstadt dan Hamilton, 1976). Gambar 5 menunjukkan salah satu stasiun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).



Gambar 5. Stasiun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Info Nuklir, 2012)

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) memanfaatkan energi hasil reaksi fisi (pembelahan inti atom U atau Pu yang menghasilkan energi) di dalam reaktor. Energi yang berupa panas ini digunakan untuk menguapkan air untuk memutar turbin dan membangkitkan listrik. Dikembangkan sejak tahun 1950, sebagian besar PLTN menggunakan air sebagai pendingin dan moderator (*light water reactors*) (Info Nuklir, 2010).

1. Perkembangan Reaktor

Perkembangan reaktor biasanya dibedakan menjadi beberapa generasi. Reaktor generasi I dikembangkan pada tahun 1950-60 dan sangat sedikit yang masih beroperasi sampai saat ini. 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 dan dimoderatori oleh air. Reaktor generasi III adalah reaktor lanjutan dari beberapa reaktor generasi I yang beroperasi di Jepang. Reaktor generasi III ini merupakan perkembangan dari reaktor generasi II dengan meningkatkan sistem keamanan (World Nuclear, 2012).

Selanjutnya adalah reaktor generasi IV yang dirancang tidak hanya untuk memasok daya listrik, tetapi juga untuk memasok energi termal untuk industri. Oleh karena itu PLTN Generasi IV tidak lagi disebut sebagai PLTN tetapi Sistem Energi Nuklir (SEN). Enam tipe reaktor Generasi IV adalah : *Very High Temperature Reactor (VHTR)*, *Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)*, *Gas-cooled Fast Reactor (GFR)*, *Liquid metal cooled Fast Reactor (LFR)*, *Molten Salt Reactor (MSR)* dan *Supercritical Water cooled Reactor (SCWR)* (Harvego dan Schultz, 2009).

Tujuan utama dalam desain dan operasi reaktor nuklir adalah pemanfaatan energi atau radiasi yang dilepaskan oleh reaksi berantai yang terkendali dan mempertahankan peristiwa fisi nuklir dalam inti reaktor (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).

Reaktor modern dibuat lebih kompleks, tidak hanya bahan bakar yang dibuat dengan sangat hati-hati tetapi juga menyediakan pendingin (*coolant*) selama berlangsungnya reaksi fisi dan pelepasan energi.

2. Komponen Dasar Sebuah Reaktor

Untuk dapat mengendalikan laju pembelahan (reaksi fisi), sebuah reaktor nuklir harus didukung oleh beberapa fasilitas yang disebut sebagai Komponen Reaktor. Komponen-komponen reaktor nuklir harus memenuhi standar kualitas yang tinggi dan handal, sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan atau kegagalan komponen tersebut sangat kecil. Adapun komponen dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut.

a. Bahan Bakar (*fuel*)

Bahan bakar nuklir merupakan bahan yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir. Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil (Lewis, 2008). Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir diantaranya yaitu Uranium-235, Uranium-233, Plutonium-239 dan Thorium (Dunia Fisika, 2009)

b. Moderator

Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (+ 2 MeV) menjadi neutron dengan energi termal (+

0,02 - 0,04 eV) agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir. Selain itu, moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Persyaratan yang diperlukan untuk bahan moderator yang baik adalah dapat menghilangkan sebagian besar energi neutron cepat tersebut dalam setiap tumbukan. Bahan-bahan yang digunakan sebagai moderator, antara lain: air ringan (H_2O), air berat (D_2O), Grafit dan Berilium.

c. Batang Kendali (*control rod*)

Setiap reaksi fisi menghasilkan neutron baru yang lebih banyak (2 - 3 neutron baru), maka perlu diatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar adalah batang kendali. Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron. Bahan-bahan tersebut antara lain Kadmium (Cd), Boron (B), atau Haefnium (Hf).

d. Perisai (*Shielding*)

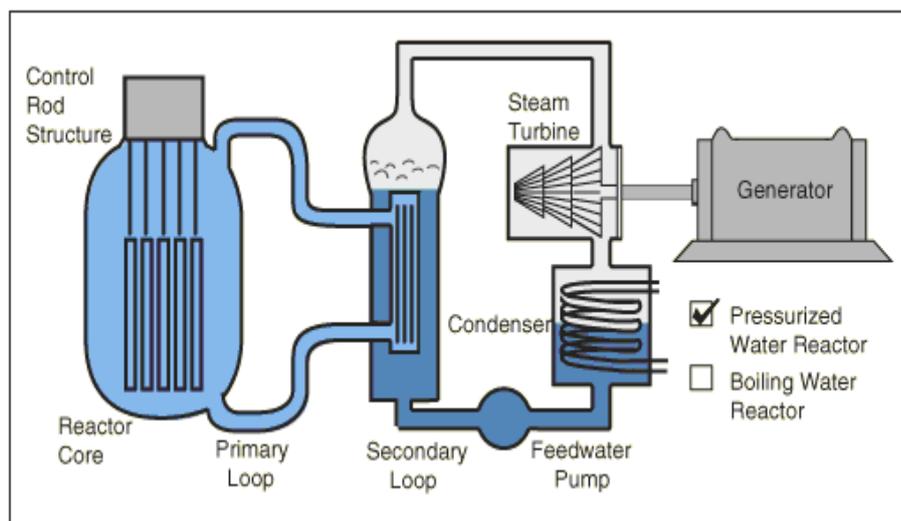
Perisai (*shielding*), berfungsi sebagai penahan agar radiasi hasil fisi bahan tidak menyebar pada lingkungan luar dari sistem reaktor. Karena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat potensial, maka diperlukan suatu sistem perisai yang mampu menahan semua jenis radiasi tersebut pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (World Nuclear, 2012).

3. Jenis Reaktor

Ada beberapa jenis reaktor nuklir yang cukup terkenal dan telah dikembangkan oleh beberapa negara, yaitu reaktor jenis reaktor air bertekanan (*Pressurised Water Reactors/PWR*), reaktor air mendidih (*Boiling Water Reactors/ BWR*) (Roulstone, 2011), dan jenis terbaru yang sedang dikembangkan yaitu reaktor air superkritis (*Supercritical Water Reactors/SCWR*) (Buongiorno, 2003). Berikut ini sekilas mengenai PWR dan BWR.

a. *Pressurised Water Reactors (PWR)*

Reaktor jenis PWR berasal dari reaktor kapal selam dan digunakan hampir di sebagian besar belahan dunia, reaktor ini memiliki efisiensi termal yang rendah yaitu sekitar 33%, PWR beroperasi pada tekanan 16 MPa dengan temperatur rata-rata 280-290 °C. Skematik reaktor jenis PWR seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

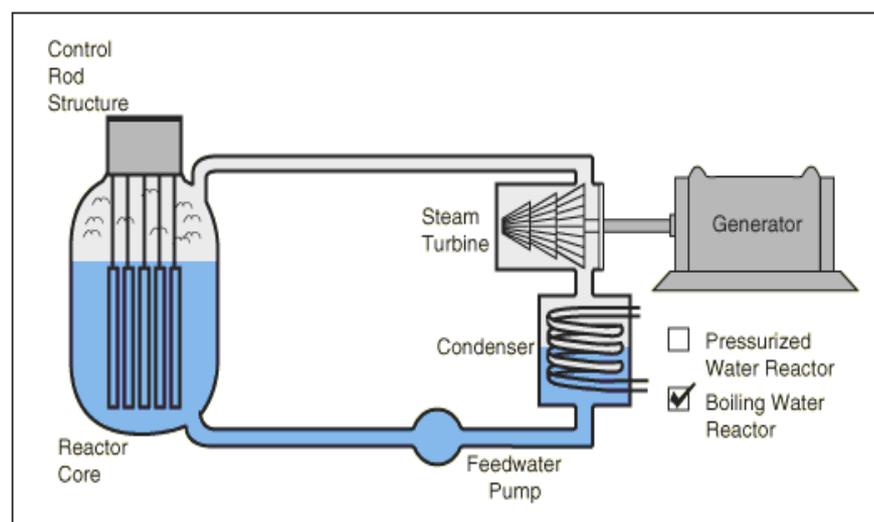


Gambar 6. Skematik Reaktor Jenis PWR (Pramuditya dan Waris, 2005)

Bahan bakar reaktor ini adalah 3% Uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan Zircalloy sedangkan batang kendali (*control rods*) dioperasikan dari bagian atas reaktor, penggantian bahan bakar dilakukan setiap 3 tahun sekali. Pada reaktor ini, air primer dan air sekunder mampu dipisahkan secara kimia. PWR banyak digunakan di Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Spanyol, Rusia dan China (Roulstone, 2011).

b. *Boiling Water Reactors (BWR)*

Reaktor jenis BWR beroperasi pada tekanan 7,3 MPa dengan temperatur rata-rata 310° C. Bahan bakar reaktor ini adalah 3% Uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan Zircalloy sedangkan *control rods* dioperasikan dari bagian bawah reaktor sehingga tidak jatuh ke inti dan menghentikan reaktor, penggantian bahan bakar (*recycle*) dilakukan setiap 2 tahun sekali. Skematik reaktor jenis BWR ini seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skematik Reaktor Jenis BWR (Pramuditya dan Waris, 2005)

Pendingin pada reaktor jenis ini terjadi secara konveksi (alami). Pemisah uap berada di atas inti dan berhadapan langsung dengan turbin uap sehingga beberapa diantaranya terkontaminasi. BWR banyak digunakan di Amerika Serikat, swedia dan Jepang (Roulstone, 2011).

C. Uranium

Uranium ditemukan pertama kali oleh Martin Klaproth seorang kimiawan Jerman pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Dalam tabel skala unsur-unsur yang diurutkan berdasarkan kenaikan massa inti atom, uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami (Hidrogen adalah yang paling ringan) dan diklasifikasikan sebagai logam. Uranium memiliki titik leleh yang relatif tinggi yaitu 1132 °C. Simbol kimia untuk Uranium adalah U (World Nuclear, 2012).

Selama bertahun-tahun dari tahun 1940-an, hampir semua uranium yang ditambang digunakan untuk produksi senjata nuklir. Tetapi sejak tahun 1970-an uranium dikembangkan sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir. Uranium alami ditemukan di kerak bumi adalah terdiri dari tiga buah isotop yaitu Uranium-238 (99,275%), Uranium-235 (0,720%) dan Uranium-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut hanya Uranium-235 saja yang bersifat fisil (Kidd, 2009).

Saat ini dan di masa depan, uranium merupakan sumber energi penting mengingat kelimpahannya yang cukup besar. Meskipun demikian uranium dikategorikan sebagai sumber energi tak-terbarukan (*non-renewable energy source*). Uranium yang terkandung dalam batuan phosphate diperkirakan 22 juta ton, dan di air laut adalah 4200 juta ton (Info Nuklir, 2010).

D. Thorium

Thorium adalah logam alami yang bersifat radioaktif, ditemukan pada tahun 1828 oleh Jons Jacob Berzelius seorang kimiawan Swedia. Thorium ditemukan dalam bentuk kecil diantara batu dan tanah dimana jumlahnya tiga kali lipat lebih banyak daripada Uranium. Tanah umumnya mengandung 6 ppm Thorium. Pada keadaan murni Thorium merupakan logam putih keperakan yang berkilau. Namun, bila terkontaminasi oksigen, Thorium perlahan akan memudar di udara menjadi abu-abu dan akhirnya hitam.

Thorium seperti halnya Uranium dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir meskipun tidak bersifat fisil (Kidd, 2009) . Oleh karena itu Thorium-232 tidak dapat langsung digunakan dalam reaktor termal. Namun, Thorium-232 yang bersifat fertil akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan Uranium-233 yang bersifat fisil (World Nuclear, 2012) sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam reaktor.

Bahan bakar Thorium memerlukan bahan fisil yang berfungsi sebagai penggerak sehingga terjadi reaksi berantai dan dengan demikian pasokan neutron dapat dipertahankan. Bahan fisil yang dapat digunakan sebagai penggerak adalah Uranium-233, Uranium-235 atau Plutonium-239, namun semua bahan tersebut tidak ada yang mudah untuk dihasilkan.

Dalam bahan bakar Thorium, semua fisi berasal dari komponen penggeraknya misalnya Uranium-233. Fisi dari Uranium-233 ini menghasilkan jumlah energi yang sama dengan Uranium-235 yaitu sebesar 200 MeV (World Nuclear, 2012).

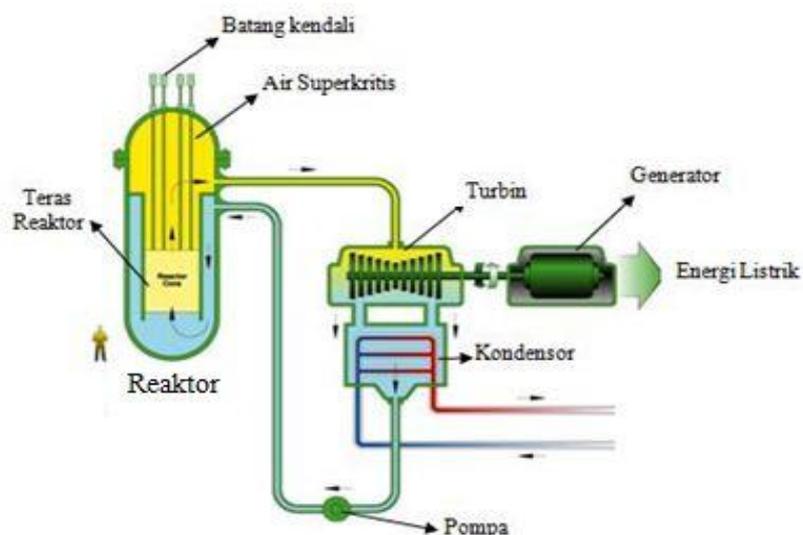
Bahan bakar Thorium menawarkan keberlanjutan dari nuklir sebagai sumber energi listrik dan penggunaan sumber daya alam yang lebih sedikit (Wilson, et al 2008). Penggunaan Thorium sebagai bahan bakar reaktor nuklir ini lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Thorium lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok digunakan untuk senjata nuklir (Kamei dan Hakami, 2010). Thorium lebih murah karena jumlahnya yang melimpah di bumi, yaitu empat kali lebih banyak dibandingkan dengan jumlah Uranium. Selain itu, bahan bakar Thorium lebih bersih dan ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO₂ dari sektor energi listrik (Kamei, 2008) dan menghasilkan limbah yang lebih sedikit (Wilson et al, 2008).

Limbah radioaktif yang dihasilkan oleh Thorium lebih sedikit jika dibandingkan dengan Uranium. Bahan bakar Thorium menghasilkan 0,5 kg Plutonium, sementara bahan bakar Uranium menghasilkan 230 kg Plutonium dari reaktor dengan kapasitas 1 Gwe selama waktu operasi satu tahun (Kamei dan Hakami, 2010).

Bahan bakar Thorium telah dikaji sebagai alternatif bahan bakar nuklir pada reaktor jenis PWR dan CANDU untuk menghemat sumber daya uranium dan menyediakan sumber energi yang mandiri (Jeong, et al, 2008). Bahan bakar Thorium juga dapat dioperasikan dengan aman pada reaktor jenis BWR (Carrera, et al, 2007). Selain itu jenis reaktor yang dikenal menggunakan bahan bakar Thorium adalah Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactors/MSR*) (Weinberg, 1997).

E. *Supercritical Water Reactor (SCWR)*

Reaktor air superkritis atau *Supercritical Water Reaktor (SCWR)* merupakan jenis reaktor generasi IV yang disebut juga sebagai reaktor masa depan (Oka, 2010). Pada prinsipnya efisiensi yang lebih tinggi dan ekonomi yang lebih baik membuat konsep SCWR mampu bersaing dengan desain reaktor air ringan yang ada (Ammirabile, 2010). SCWR ini memiliki banyak keuntungan lebih meluas saat ini sebagai reaktor air ringan (Reiss, et al, 2010). Reaktor air superkritis (SCWR) menawarkan potensi berupa efisiensi termal yang tinggi dan cukup sederhana dalam pembangunannya. Salah satu keunggulan dari reaktor air superkritis ini adalah variasi termal pada bagian fisiknya di sekitar garis *pseudo-critical* (X. Cheng et al, 2007). SCWR memiliki ukuran fisik yang lebih kecil tetapi mampu menghasilkan energi yang besar (Tsiklauri, et al, 2004). Sehingga SCWR juga memberikan potensi penghematan dalam hal biaya. Gambar 8 menunjukkan skematik dari reaktor jenis SCWR.



Gambar 8. Skematik Reaktor Jenis SCWR (World Nuclear, 2012)

Reaktor SCWR merupakan reaktor air yang bekerja di atas titik kritis air (Buongiorno, 2003), dimana SCWR beroperasi pada tekanan 25 MPa dengan menggunakan air sebagai pendingin dan moderator (Oka, et al, 2003) sedangkan titik kritis air adalah 22,1 MPa. Pada tekanan tersebut jika temperatur air terus dinaikkan tidak akan terjadi perubahan fasa sehingga perubahan entropi reaktor lebih besar dan efisiensi panas yang ditransfer oleh reaktor menjadi lebih besar. Pada reaktor berpendingin air superkritis karakteristik dari air akan berubah sangat signifikan di sekitar titik kritisnya (Sriyono, 2008). Seperti halnya air pada keadaan sub-kritis dikenal istilah mendidih pada temperatur tertentu, air pada keadaan super kritis mengalami *pseudo-critical* pada temperatur 385 C dan tekanan 25 MPa. Pada temperatur dan tekanan tersebut air memiliki kapasitas panas yang lebih tinggi, sehingga keadaan inilah yang disebut keadaan efisiensi paling tinggi (Oka, 2010). Untuk meningkatkan efisiensi dari SCWR dibutuhkan selongsong (*cladding*) bahan bakar yang mampu menahan suhu yang tinggi (Tsiklauri, et al, 2004).

Desain SCWR cenderung untuk memperoleh efisiensi termal yang tinggi dan dengan konfigurasi sistem yang sederhana. Tantangan untuk SCWR adalah dalam mengembangkan desain inti yang layak, akurat dengan memperkirakan koefisien perpindahan panas dan mengembangkan bahan-bahan untuk struktur bahan bakar dan inti yang cukup tahan akan korosi untuk mempertahankan keadaan superkritisnya (World Nuclear, 2012). Oleh karena itu, pengembangan dan penelitian dalam bidang SCWR membuka kesempatan dan peluang yang

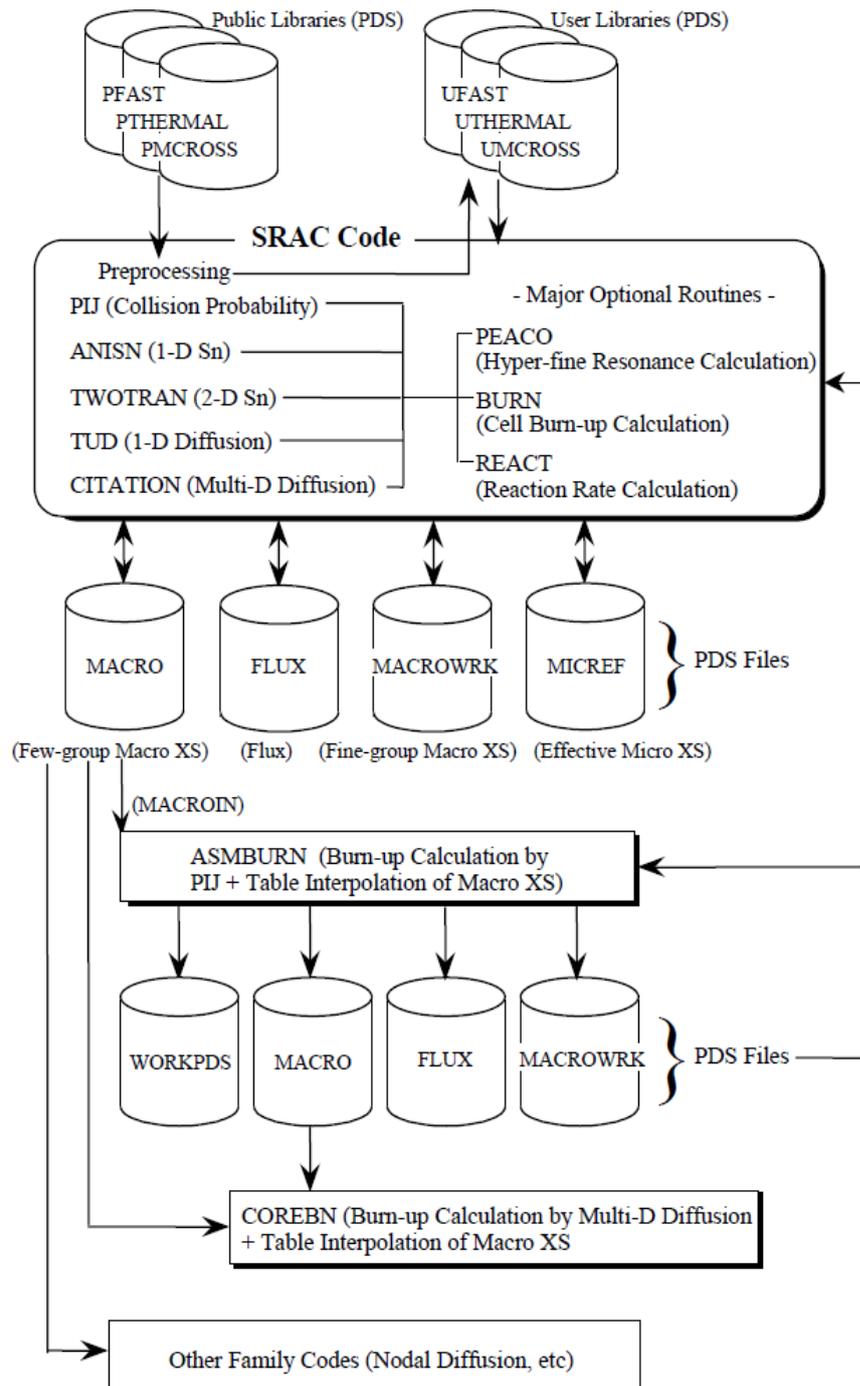
besar untuk peneliti muda dan mahasiswa dalam program teknologi nuklir (Liu dan Cheng, 2010).

Penelitian tentang desain SCWR sebelumnya telah dilakukan oleh Sigit dan Andang (2006) yang mendesain teras SCWR dengan menggunakan bahan bakar Plutonium. Penelitian tersebut menghasilkan desain teras reaktor dengan daya termal 300 MWth dan mencapai kekritisian dengan nilai k -efektif sebesar 1,03157. Sedangkan dalam penelitian ini membuat desain SCWR dengan menggunakan bahan bakar Thorium, daya termal yang dihasilkan lebih tinggi dengan nilai k -efektif yang lebih baik.

F. System Reactor Atomic Code (SRAC)

SRAC merupakan sebuah sistem kode yang terpadu untuk analisis penghitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal (Okumura, 2002). SRAC mulai dikembangkan pada tahun 1978 sebagai standar untuk kode analisi reaktor termal di badan energi atom Jepang (Japan Atomic Energy Agency/JAEA) (Okumura, 2007).

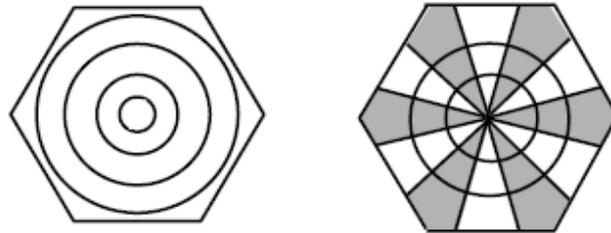
Sistem pada SRAC terdiri dari penyimpanan data (*libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-VI, JEF-2.2, dan sebagainya), dan lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Adapun struktur dari sistem SRAC adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur dari sistem SRAC

Kode dasar pada sistem SRAC yaitu sebagai berikut.

1. PIJ, yaitu kode untuk probabilitas tumbukan yang telah dikembangkan oleh JAERI meliputi 16 kisi geometri. Salah satu bentuk kisi geometri pada PIJ seperti ditunjukkan pada gambar 10 berikut.



Gambar 10. Bentuk Sel Pin Heksagonal

2. ANISN, yaitu kode transport satu dimensi (S_N) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (R_S).
3. TWOTRAN, yaitu kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X-Y), silinder (R-Z) dan lingkaran (R- θ).
4. TUD, yaitu kode untuk persamaan difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (R_S).
5. CITATION, yaitu kode untuk persamaan difusi multi-dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segi enam (heksagonal), (Okumura, 2002).