

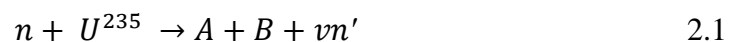
I. TEORI DASAR

2.1 Reaktor Nuklir

Lebih dari tiga dekade, sejak reaktor nuklir pertama dibuat yaitu dengan reaksi fisi kritis di stadion lapangan bola Universitas Chicago. Sejak saat itu seluruh dunia telah melakukan riset dan pengembangan teknologi reaktor nuklir untuk memanfaatkan besarnya energi yang terdapat di dalam inti atom bagi kesejahteraan generasi berikutnya. Reaktor dapat menghasilkan radiasi nuklir dengan jumlah yang banyak dalam bentuk neutron dan sinar gamma. Radiasi tersebut dapat digunakan untuk menyelidiki struktur mikroskopis dan suatu materi (neutron atau gamma spektroskopi). Radiasi yang dihasilkan reaktor juga dapat digunakan untuk mentransmutasikan nukleus menjadi isotop buatan yang kemudian dapat digunakan, misalnya, sebagai pelacak radioaktif dalam industri atau aplikasi medis. Reaktor dapat menggunakan skema yang sama untuk menghasilkan bahan bakar nuklir dari bahan nonfissile. Misalnya, U^{238} dapat disinari oleh neutron dalam reaktor dan ditransmutasikan ke Pu^{239} sebagai bahan bakar nuklir. Ini adalah proses yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar "*breed*" (berkembang biak) di reaktor *breeder* cepat yang sedang dikembangkan untuk aplikasi bersifat komersil pada generasi berikutnya.

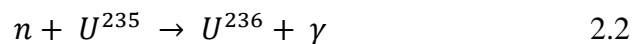
Pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki kesamaan dengan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil yang lebih dulu digunakan sebagai sumber energi. Saat ini energi listrik yang ada telah menggunakan nuklir sebagai pembangkit listrik pengganti bahan bakar fosil. Nuklir dapat menghasilkan lebih dari 1000 MWe (megawatt-elektrik) atau cukup untuk memasok kebutuhan listrik kota besar dengan penduduk 400.000 orang. (Duderstadt dkk, 1975).

Reaktor nuklir disusun dari atom yang fissionable (dapat melakukan pembelahan sel sendiri) seperti U^{235} atau Pu^{239} . Nukleus yang fissionable menabrak neutron, sehingga terjadilah reaksi fisi, seperti rumus kimia 2.1 berikut.



Inti U^{235} menabrak neutron menghasilkan 2 produk fisi yaitu A dan B, serta neutron tambahan yaitu ν (jumlah neutron/fisi). Pada reaksi fisi yang menggunakan energi thermal menghasilkan neutron tambahan $\nu \sim 2,42$.

Pada reaksi fisi terdapat kemungkinan radiasi yang ditangkap, seperti reaksi 2.2 sebagai berikut,



Rasio dari radiasi yang ditangkap pada reaksi fisi umumnya diberi simbol α . α merupakan perbandingan *microscopic cross section* (penampang melintang) radiasi yang ditangkap σ_c dan reaksi fisi σ_f , seperti persamaan 2.3 berikut:

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f} \quad 2.3$$

Dibawah ini Tabel 2.1 perbandingan α untuk atom U^{235} dan Pu^{239} .

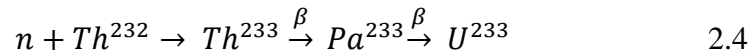
Tabel 2.1. Nilai α sebagai fungsi dari energi neutron

Isotop	Energi	α
U^{235}	Termal	0,18
	30 eV	0,65
	100 eV	0,52
	1200 eV	0,47
	15 keV	0,41
Pu^{239}	Termal	0,42
	100 eV	0,81
	1200 eV	0,60
	15 keV	0,45

Dapat dilihat pada Tabel 2.1 diatas merupakan nilai α sebagai fungsi dari energi neutron untuk isotop atom U^{235} dan Pu^{239} .

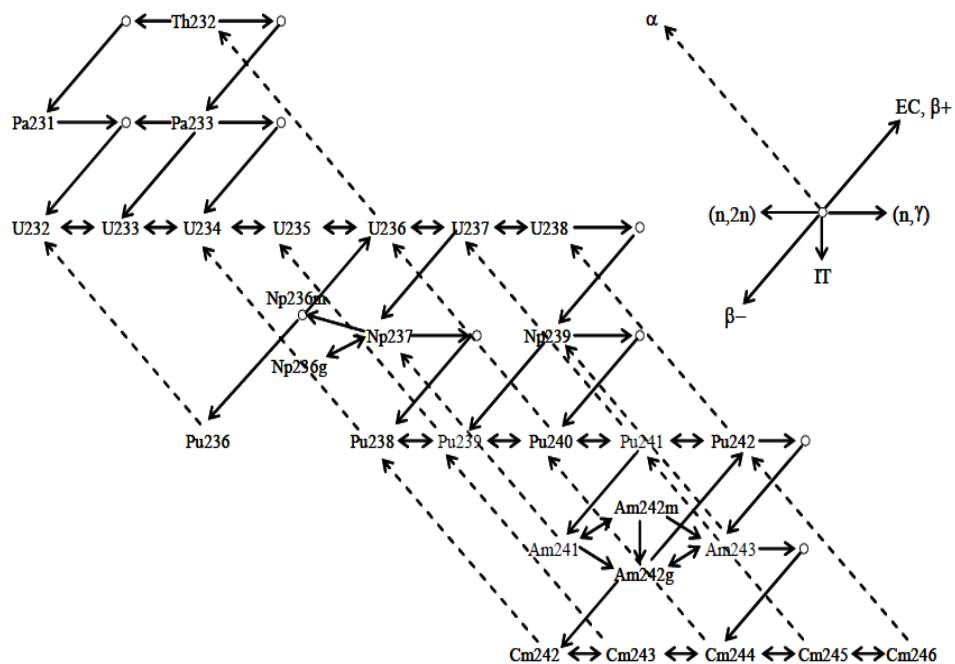
Rangkaian reaktor terjadi ketika neutron ν yang dipancarkan selama proses fisi menabrak nukleus yang *fissionable* sehingga memproduksi lebih banyak lagi produk fisi. Untuk reaktor yang bereaksi fisi dalam keadaan stabil (dalam keadaan kritis), perlu adanya keseimbangan antar neutron yang dihasilkan pada proses fisi dan produk yang hilang. Kerugian tidak hanya mencakup neutron yang menghasilkan reaksi fisi berikutnya dan yang hilang selama reaksi berlangsung (penangkapan radiasi pada pin bahan bakar), tetapi juga yang ditangkap oleh nukleus yang ada pada sistem (material, pendingin, *moderator*) dan mengalami kebocoran pada sistem dan tidak dapat diperbaiki kembali. Salah satu tujuan dari penelitian fisika reaktor adalah untuk menghitung keseimbangan reaktor dalam menyesuaikan ukuran dan komposisi suatu reaktor yang aman (Zweifel, 1973).

Thorium²³² termasuk bahan fertile (tidak mengalami reaksi fisi melainkan reaksi penangkapan) apabila menangkap neutron maka akan meluruh seperti reaksi penangkapan 2.4 sebagai berikut:



Reaksi diatas merupakan reaksi singkat yang menghasilkan U²³³ dan beberapa produk fisi lain, menunjukkan thorium menjadi alternatif sebagai bahan bakar reaktor nuklir (Media Nuklir, 2010).

Reaksi fisi berantai dari Th²³² hingga menghasilkan U²³³ dan hasil fisi yang lain dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Rantai Reaksi Nuklida Thorium (Okumura, 2002)

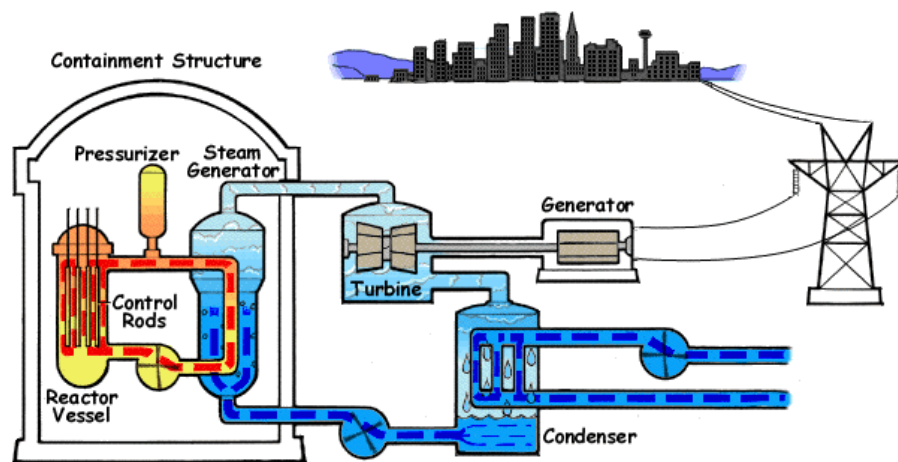
Tujuan utama dari desain dan operasi reaktor nuklir adalah pemanfaatan dari energi atau radiasi yang dihasilkan oleh reaksi fisi berantai yang terjadi pada teras reaktor.

Pada tipe PWR, bahan bakar berbentuk *pellet* tersusun menjadi batangan (*fuel pin*) yang dibundel (*fuel-assembly*) dan disusun dalam teras reaktor (Pura, 2010).

2.2 Jenis – jenis Reaktor

2.2.1. Light Water Reactors (Reaktor Air Ringan)

1. Pressurised Water Reactor (Reaktor Air Bertekanan)



Gambar 2.2 Pressure Water Reactor (Roulstone, 2011)

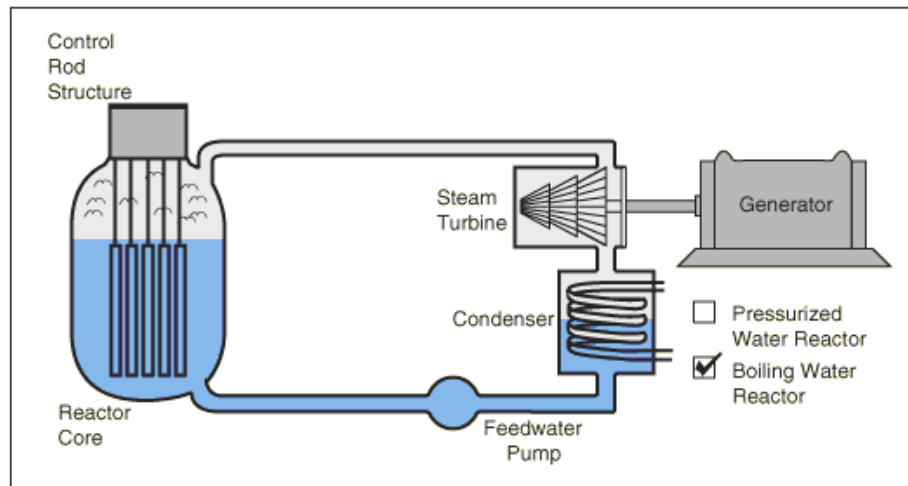
Gambar 2.2 diatas merupakan salah satu jenis reaktor LWR yang mempunyai tekanan 16 MPa, temperatur rata – rata 280 – 290°C. Inti (*core*) reaktor terdiri dari bundel yang diperkaya 3% dengan bahan bakar *uranium oksida*, bundel yang terbuka berupa tabung yang dilapisi dengan *zircaloy*. Batang kendali yang vertikal dioperasikan dari bagian atas reaktor, beberapa loop (3 atau 4) membawa air pendingan ke atas mengalir melalui inti. Pengisian bahan bakar dilakukan dengan interval waktu 3 tahun dari atas inti, melalui bagian atas bejana (*vessel*) yang dapat dilepas. Injeksi pendingin yang kompleks dan masalah sistem pemindahan peluruhan panas

ditangani oleh desain Westinghouse AP1000 terbaru. Desain reaktor yang paling populer, berkisar 50% dari daya yang terpasang berasal dari Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Spanyol, Rusia dan China, memiliki siklus bahan bakar yang lama dan takaran pengoperasian yang rendah (Roulstone, 2011).

Setelah adanya kejadian Fukushima Daichi di Jepang yang menyebabkan teras reaktor mengalami rusak parah (*core damage*) yang mengakibatkan tidak berfungsinya pendingin darurat karena gagalnya pasokan daya darurat oleh terpaab tsunami, membuat seluruh jenis PLTN harus memiliki keselamatan pasif. Indonesia sebagai negara yang ingin membangun PLTN karena kebutuhan energi listrik, perlu memilih jenis reaktor yang memiliki sistem keselamatan pasif tetapi juga memiliki keluaran daya elektrik besar, misalnya 1000 MW (elektrik). Salah satu jenis reaktor yang memiliki persyaratan tersebut adalah reaktor PWR kelas 1000 Mwe yang didesain oleh Westinghouse dengan nama dagang AP1000.

Salah satu parameter keselamatan yang penting adalah kritikalitas yaitu kemampuan mengendalikan populasi neutron sepanjang reaktor beroperasi. Tujuan penelitian yang dilakukan oleh Sembiring ini adalah untuk mendapatkan suatu model teras 3-dimensi AP1000 yang detail dan siap diaplikasikan dalam evaluasi parameter kritikalitas (Sembiring, 2011).

2. *Boiling Water Reactor* (Reaktor Air dengan Pemanas)



Gambar 2.3 *Boiling Water Reactor* (Roulstone, 2011)

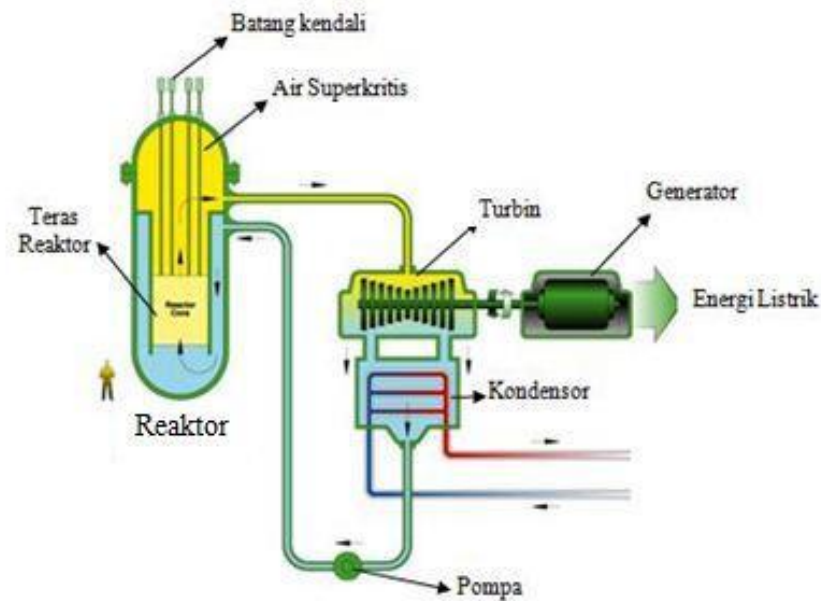
Gambar 2.3 di atas merupakan salah satu jenis reaktor LWR yang mempunyai tekanan 7,3 MPa dan temperatur rata – rata 310°C. Inti (*core*) reaktor berbentuk bundel yang diperkaya dengan bahan bakar *uranium oksida* satu bundel dilapisi tabung yang berbahan *zircalloy*. Batang pengendali vertikal dioperasikan dari bawah inti jangan sampai turun (jatuh) ke inti, untuk dapat mematikan reaktor. Pendingin reaktor mengalir dengan konveksi alam. Uap pemisah berada di atas inti dengan umpan langsung ke turbin uap yang basah, sebagian mengalami kontaminasi (pencemaran). Pengisian bahan bakar berlangsung pada interval 2 tahundari atas inti melalui bagian atas wadah (*vessel*) yang dapat dilepas. Pendingin kimiawi menutup pencemaran dari air kondensor sebagai syarat keamanan inti, tidak memilih tempat di pantai karena memiliki potensi untuk pencemaran klorida. Pertahanan terhadap kecelakaan besar harus

memperhitungkan reaktor dan pembangunan penahan turbin dan lain – lain (Roulstone, 2011).

2.2.2. *Supercritical Water Reactor (SCWR)*

Supercritical Water Reactor (SCWR) merupakan salah satu reaktor generasi ke IV yang menjanjikan sebab reaktor ini simple, efisiensi temperatur yang tinggi, dan hampir 50 tahun industri menggunakan energi panas dari pembangkit dengan siklus SCWR. Berdasarkan desain reaktor yang telah ada, terdapat dua konsep utama dari SCWR yaitu: a) sebuah bejana bertekanan yang mengandung inti reaktor (berbahan bakar) sumber panas, dianalogikan seperti pada PWR dan BWR, dan b) tabung bertekanan yang dialirkan atau saluran yang mengandung *bundles* (kumpulan) bahan bakar, dianalogikan seperti pada reaktor nuklir CANDU dan RBMK.

Banyak dilakukan penelitian yang difokuskan pada bejana bertekanan yang merupakan fitur dari SCWR (Shan, 2010).



Gambar 2.4 *Supercritical Water Reactor* (Oka, 2010)

Gambar 2.4 diatas adalah reaktor SCWR lengkap dengan teras reaktor sebagai penghasil neutron dan turbin penggerak generator dan pompa untuk penggerak air kembali ke teras reaktor.

Reaktor SCWR bekerja pada tekanan tinggi di atas titik kritis air, dimana SCWR beroperasi pada tekanan 25 Mpa sedangkan titik kritis air adalah 22,1 Mpa. Pada tekanan tersebut, jika temperatur air terus dinaikkan tidak akan terjadi perubahan fasa. Oleh karena itu perubahan entropi reaktor lebih besar dan efisiensi panas yang ditransfer oleh reaktor menjadi lebih besar. 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 dkk, 2010).

2.3 Uranium

Uranium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang U dan nomor atom 92. Uranium merupakan logam putih keperakan yang termasuk dalam deret aktinida pada tabel periodik. Uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron, dan berelektron valensi 6. Inti uranium mengikat sebanyak 141 sampai dengan 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Isotop yang paling umum adalah U^{238} (146 neutron) dan U^{235} (143 neutron). Semua isotop uranium tidak stabil dan bersifat radioaktif lemah. Uranium memiliki bobot atom terberat kedua di antara semua unsur-unsur kimia yang dapat ditemukan di alam. Massa jenis uranium kira-kira 70% lebih besar daripada timbal, namun tidaklah sepadat emas ataupun tungsten. Uranium dapat ditemukan di alam dalam konsentrasi rendah (beberapa bagian per juta (ppm)) dalam tanah, bebatuan, dan air.

Uranium yang dapat dijumpai di alam dengan presentase U^{238} (99,2742%), U^{235} (0,7204%), dan sedikit U^{234} (0,0054%). Uranium meluruh secara lambat dengan memancarkan partikel alfa. Umur paruh U^{238} adalah sekitar 4,47 milyar tahun, sedangkan untuk U^{235} adalah 704 juta tahun. Oleh sebab itu, uranium dapat digunakan untuk penanggalan umur Bumi.

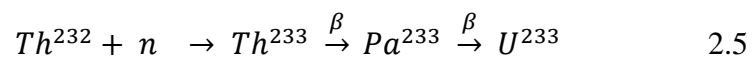


Gambar 2.5 Uranium (Wikipedia, 2012)

Gambar 2.5 diatas merupakan contoh uranium (U^{238}).

U^{235} merupakan satu-satunya isotop unsur kimia alam yang bersifat fisil (yakni dapat mempertahankan reaksi berantai pada fisi nuklir), sedangkan U^{238} dapat dijadikan fisil dengan cara ditransmutasikan menjadi Pu^{239} (plutorium) yang bersifat fisil dalam reaktor nuklir. Isotop uranium lainnya yang juga bersifat fisil adalah U^{233} , yang dapat dihasilkan dari Th^{232} (thorium) (Wikipedia, 2012).

Reaksi kimia 2.5 untuk bahan fisil U^{233} yang merupakan hasil penyerapan neutron oleh bahan fertil Th^{232} adalah sebagai berikut:



Dapat dilihat reaksi 2.5 diatas yaitu thorium menangkap neutron lalu menjadi isotop baru yaitu Th^{233} , selanjutnya memancarkan elektron (peluruhan beta) karena peralihan cepat menjadi protactinium (Pa^{233}) dalam waktu tertentu. Lalu Pa^{233} mengalami proses transmudasi lambat dengan peluruhan beta yang pada akhirnya menjadi fisil U^{233} .

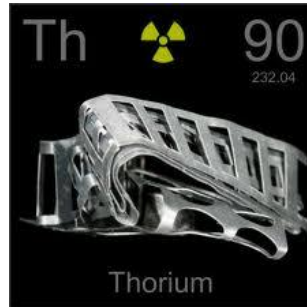
Dalam beberapa penelitian yang sudah dilakukan, diperkirakan bahwa jika semua persediaan uranium di alam dapat dikonversikan menjadi bahan fisil didasarkan pada pemakaian reaktor pembiak, maka bahan bakar nuklir akan meningkat 100 kali dibandingkan sebelumnya. Kelimpahan thorium (Th) dalam kerak bumi diperkirakan 3 kali kelimpahan uranium di alam (Gunanjar, 2008).

Uranium alamiah, sedikit diperkaya dengan U^{235} dengan kadar yang rendah, digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir untuk menghasilkan listrik. Thorium dari alam dapat diradiasikan dengan neutron untuk menghasilkan isotop U^{233} . Satu pon uranium yang tereaksi fisi secara lengkap memiliki nilai bahan bakar yang sama dengan batu bara sebanyak 1500 ton lebih. Kapasitas 429 reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir di seluruh dunia yang beroperasi pada Januari 1990 diperkirakan mencapai 311000 megawatt.

2.4 Thorium

Thorium terdapat dalam thorit dan thorianit. Lambang thorium adalah Th dan memiliki nomor atom 90. Ketersediaan thorium diduga tiga kali lebih banyak daripada uranium, dan sama banyaknya dengan timbal atau molibden. Thorium didapatkan sebagai hasil samping pertambangan mineral monazit, yang mengandung ThO_2 sebanyak 3%-9% bersamaan dengan mineral radioaktif. Dalam keadaan murni, thorium adalah logam berwarna putih keperak-perakan yang stabil di udara dan tetap berkilau untuk beberapa bulan. Bila terkontaminasi dengan oksida, thorium mulai mengusam di udara, menjadi abu-abu dan akhirnya hitam. Sifat fisik thorium sangat dipengaruhi oleh tingkat kontaminasi oksidanya. Thorium paling murnipun sering mengandung sepersepuluh persen oksida. Thorium dengan kemurnian tingkat tinggi telah dibuat; sifatnya lunak, mudah ditempa, bisa digulung, bisa dicubit dan bisa digambar. Memiliki dua bentuk, berubah pada suhu $1400^{\circ}C$ dari bentuk kital kubus, menjadi kristal kubus berpusat badan. Logam thorium bubuk bersifat piroforik (mudah

meledak di udara dan hidrogen dapat menambah intensitas nyalanya) dan harus ditangani dengan hati-hati. Bila dipanaskan di udara, thorium memicu nyala dan terbakar dengan putih terang.



Gambar 2.6 Thorium (Chemistry, 2008)

Gambar 2.6 diatas adalah contoh logam thorium yang berwarna putih keperakan.

Logam thorium adalah sumber energi nuklir. Ada kemungkinan thorium yang berasal dari mineral kerak bumi, memiliki kandungan energi yang yang lebih banyak daripada uranium dan bahan bakar fosil. Berbagai ukuran kebutuhan thorium sebagai bahan bakar nuklir masih akan berlangsung di masa yang akan datang. Diketahui ada 25 isotop torium dengan massa atom berkisar antara 212-236. Semuanya tidak stabil. Th^{232} terdapat di alam dengan masa paruh 1.4×10^{10} tahun, dan merupakan pemancar partikel alfa (Chemistry, 2008).

Telah dilakukan penelitian dengan menggunakan thorium sebagai bahan bakar reaktor. Penelitian ini dilakukan untuk meminimalisir konsumsi uranium menggunakan kumpulan reaktor dengan tiga komponen yang berbeda dan campuran thorium/uranium untuk membuat energi nuklir yang berkelanjutan dan bersih untuk menghasilkan energi. Ketiga komponen yang berbeda tersebut adalah: plutonium diekstrak dengan menghabiskan

bahan bakar dari reaktor air bertekanan (PWR) standar (komponen pertama) yang dikonversi menjadi U^{233} dilanjut ke reaktor air mendidih (BWR) (komponen kedua) untuk memberikan masukan pada kekurangan penggunaan kembali U^{233} yang diperlukan untuk bahan bakar Th/ U^{233} dari reaktor air ringan/berat (komponen ketiga) (Wilson *et al*, 2009).

2.5 Kritikalitas

Kekritisitas suatu reaktor dapat dinyatakan dengan *multiplication factor*, k_{eff} (rasio jumlah fisi dalam satu generasi dengan jumlah fisi pada generasi sebelumnya). Reaktor dinyatakan superkritis jika $k_{eff} > 1$, sub-kritis $k_{eff} < 1$ dan dalam keadaan kritis jika $k_{eff} = 1$ (Khan dkk, 2004). Kritikalitas yaitu kemampuan mengendalikan populasi neutron sepanjang reaktor beroperasi. Sehingga jumlah neutron yang diproduksi dengan yang dihasilkan selama proses fisi dalam keadaan seimbang (Sembiring, 2011).

Terdapat sebuah penelitian yang dilakukan oleh Gomes, dkk, untuk meneliti dinamika kritikalitas dalam serbuk yang digunakan sebagai bagian dari proses bahan bakar. Simulasi numerik dilakukan dalam geometri 2D dan 3D dimana lapisan MOX, UO_2 dan zinc stearat (bertindak sebagai pelumas moderator) serbuk menjadi superkritis. Hasil dari penelitian ini yaitu penggabungan radiasi dan simulasi multifasa-multikomponen menunjukkan dinamik yang kompleks dengan peningkatan temperatur serbuk dan pencampuran moderator ke dalam MOX (Gomes, 2008).

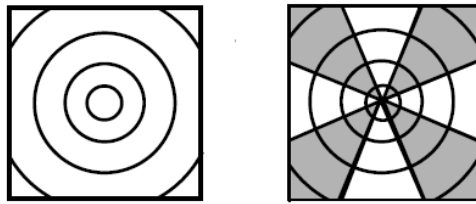
2.6 Pembiakan (*Breeding Ratio*)

Reaktor nuklir adalah sistem di mana reaksi fisi dilakukan dan dikontrol sehingga ledakan yang tidak diinginkan dapat dicegah. Desain reaktor yang aman diperlukan analisa yang akurat menjadi 3 bagian umum yaitu , analisis neutronik, analisis termal dan analisis keselamatan.

Analisis neutronik terkait dengan pengendalian bahan bakar. Analisis *burn-up* (pembakaran) dilakukan untuk mengetahui karakteristik perubahan isotop dalam reaktor. Analisis pembakaran juga memberikan parameter densitas atom yang menunjukkan perubahan densitas bahan bakar dan pembiakan dalam reaktor. Parameter lainnya adalah *breeding ratio* (rasio pembiakan), yang berarti perbandingan bahan fisi yang diproduksi dan yang digunakan dalam siklus bahan bakar (Arisa, 2009).

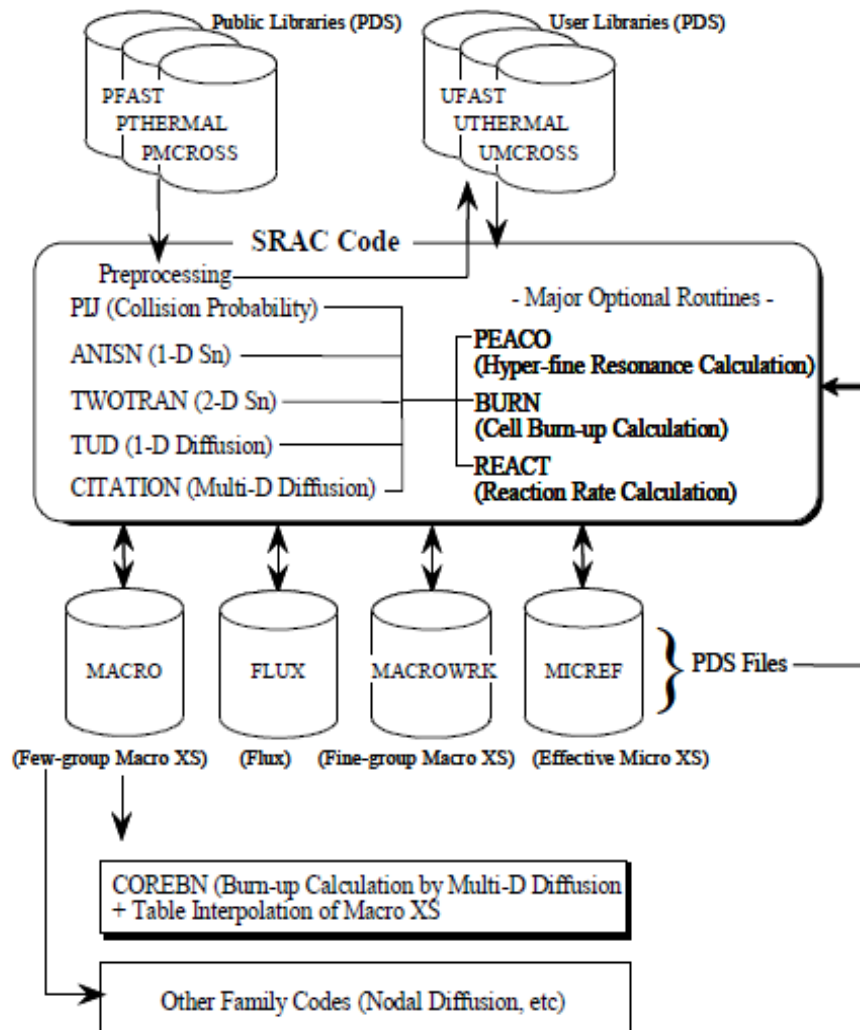
2.7 SRAC

SRAC (*Standard Thermal Reactor Analysis Code*) merupakan suatu sistem kode perhitungan neutronik yang komprehensif (menyeluruh) untuk berbagai jenis reaktor termal. Terdapat dua poin penting dalam sistem kode SRAC yaitu pembuatan grup penampang melintang (*cross sections*) mikroskopi dan makroskopi yang efektif serta analisis *burn up* yang terdiri dari sel statis dan perhitungan inti. Salah satu fitur sistem SRAC yaitu PIJ. PIJ adalah perhitungan kemungkinan tumbukan berlaku untuk 16 jenis geometri kisi.



Gambar 2.7 Sel Pin Persegi (Okumura, 2007)

Gambar 2.7 di atas merupakan salah satu contoh model geometri kisi untuk PIJ. Berbentuk persegi dengan pin sel didalamnya (Okumura, 2007).



Gambar 2.8 Struktur dari Sistem SRAC (Okumura dkk, 2002)

Gambar 2.8 diatas menunjukkan struktur dari sistem SRAC. Kode utama SRAC memadukan tiga transport (pengangkutan) dan dua kode difusi untuk perhitungan flux neutron, sebagai berikut:

1. PIJ: Kode kemungkinan tumbukan dikembangkan oleh JAERI (sekarang JAEA) meliputi 16 geometri kisi;
2. ANISN : Kode satu dimensi transport S_N meliputi geometri slab (X), silinder (R) dan bola (R_s);
3. TWOTRAN : Kode dua dimensi transport S_N meliputi geometri slab (X-Y), silinder (R-Z) dan lingkaran (R- θ);
4. TUD : Kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi geometri slab (X), silinder (R), dan bola (R_s);
5. CITATION : Kode difusi multi dimensi (banyak dimensi) melalui 12 tipe geometri termasuk segitiga dan heksagonal (Okumura, 2007).

Cell burn-up calculation (perhitungan pembakaran sel) merupakan salah satu pilihan yang terdapat dalam sistem SRAC. Di dalam perhitungan ini, terdapat dua macam langkah (*step*) yang diadopsi dari kode SRAC. Yang pertama unit pembakaran dengan panjang interval waktu relatif, dan yang lain adalah langkah sub-unit disetiap langkah pembakaran. Interval unit pembakaran ditetapkan berdasarkan input, sedangkan subunit pembakaran ditentukan dengan kode (Okumura dkk, 2002).