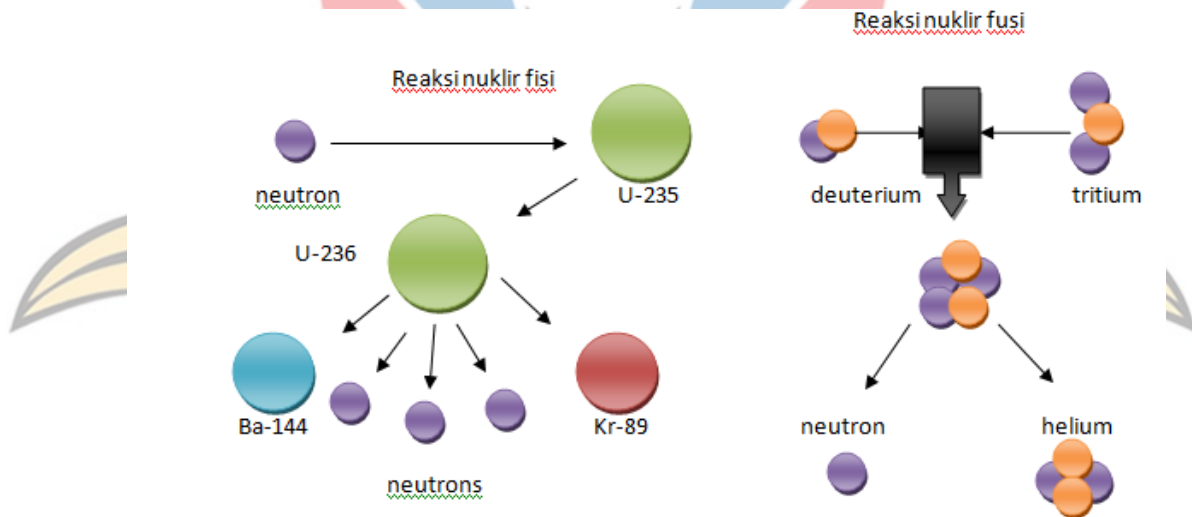


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

www.itk.ac.id

1.1. Reaksi Nuklir

Mekanisme reaksi nuklir terdiri dari dua yaitu reaksi fisi dan fusi. Reaksi fisi nuklir (*nuclear fission reaction*) adalah pembelahan inti berat menjadi inti yang lebih ringan yang kemudian memancarkan dua atau tiga neutron. Sedangkan reaksi fusi (*fusion reaction*) adalah jenis reaksi nuklir yang melibatkan penggabungan inti-inti atom dengan nomor atom kecil untuk membentuk inti yang lebih berat dengan melepaskan sejumlah besar energi (Brawijaya Univ, 2016). Reaksi fisi dan fusi ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Reaksi Nuklir Fisi dan Fusi (Penulis, 2022)

Gambar 2.1 diatas menunjukkan contoh reaksi fisi dimana Uranium-235 bergabung dengan neutron untuk membentuk perantara yang tidak stabil, yang dengan cepat terpecah menjadi barium-144 dan krypton-89 ditambah tiga neutron dalam proses fisi nuklir. Proses fusi nuklir dimana deuterium dan tritium bergabung dengan fusi nuklir membentuk helium *plus* neutron.

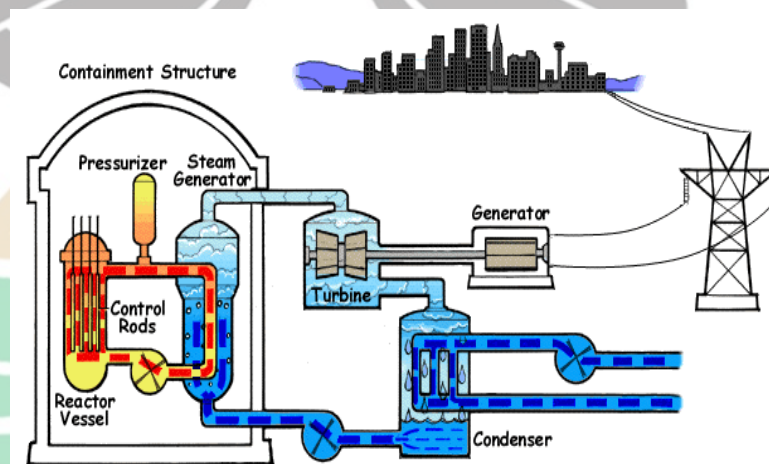
1.2. Small Modular Reactors (SMR)

Small Modular Reactor (SMR) atau reaktor modular kecil adalah bagian dari desain generasi 3+ yang dikembangkan di beberapa negara. SMR adalah reaktor nuklir yang menghasilkan kurang dari 300 MW. Ini jauh dibawah rata-rata

keluaran dari nuklir komersil modern (Generasi II atau III) reaktor listrik, sekitar 1000 MW. Tujuan dari SMR ini adalah untuk memberikan yang fleksibel, dan alternatif hemat biaya (Richter, 2014). Reaktor modular kecil memiliki beberapa desain yaitu salah satunya NuScale dengan reaktor tipe *Pressurizer Water Reactor* (PWR).

1.2.1. *Pressurizer Water Reactor* (PWR)

Pressurized Water Reactor (PWR) atau reaktor air pertama kali dikembangkan di Amerika Serikat berdasarkan pengalaman dari program reaktor angkatan laut. Unit penghasil tenaga listrik komersial pertama mulai beroperasi di Shippingport, Pennsylvania pada tahun 1957. PWR sekarang didistribusikan ke seluruh dunia. Reaktor PWR merupakan jenis reaktor termal yang menggunakan air ringan (H_2O) sebagai pendingin dan moderatornya. Karakteristik PWR lainnya memerlukan tekanan operasi 15 MPa, daya termal teras reaktor 3000 MWth menggunakan dua loop pendingin: loop primer digunakan pada teras reaktor dan loop sekunder pada turbin. Kekurangan reaktor PWR yaitu memerlukan pompa untuk menjaga tekanan pada loop primer sehingga air tetap berada pada fase cair. Dua loop pendingin sehingga terdapat dua proses transfer panas -> efisiensi berkurang (Stacey, 2018). PWR adalah reaktor termal di PLTN dan digunakan untuk memproduksi listrik.. Prinsip kerja PWR dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja PWR (Stacey, 2018).

1.2.2. NuScale

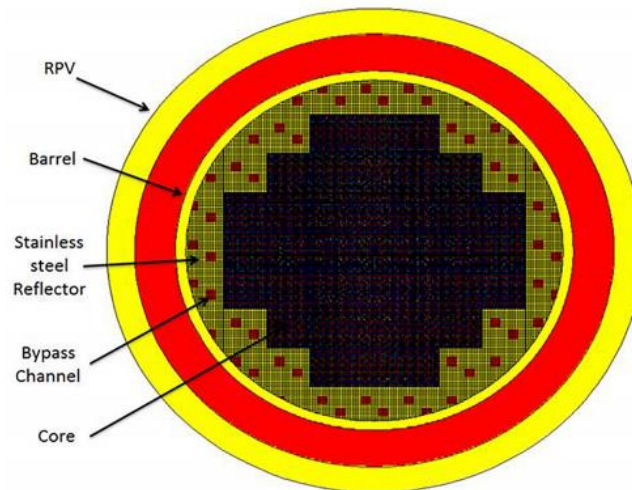
NuScale merupakan reaktor modular berdaya kecil dengan daya termal 160 MWt daya listrik 45 MWe. PLTN ini merupakan generasi 3+ dari reaktor air tekan *Pressurizer Water Reactor* (PWR) yang dikembangkan oleh *Oregon State University*. NuScale diproduksi oleh perusahaan NuScale Power yaitu perusahaan *limited liability company* yang berkantor pusat di Tigard, Oregon. Bahan bakar yang digunakan adalah UO_2 dan pergantian bahan bakar yang cukup panjang yaitu 24-30 bulan (Lumbanraja, Barat and Prapatan, 2012).

Reaktor NuScale memiliki keuntungan dan kerugian yaitu sebagai berikut (Lumbanraja, Barat and Prapatan, 2012):

Tabel 2. 1 Keuntungan dan Kerugian Reaktor NuScale

No	Keuntungan	Kerugian
1	Dasar rancangan PLTN ini didasarkan pada teknologi reaktor air tekan (PWR) konvensional.	Jumlah unit PLTN yang dapat dikembangkan hingga 12 unit dalam satu lokasi dan hanya mempunyai satu ruang kendali utama (RKU) seperti ditunjukkan pada beberapa PLTN dalam satu lokasi harus diatur dan dikendalikan secara teliti baik saat perawatan dan penginspeksian.
2	Sistem pendingin didasarkan hanya pada konveksi alamiah dan tidak membutuhkan pompa untuk menggerakkan air pendingin seperti PWR konvensional.	Setiap modul PLTN membutuhkan infrastruktur transportasi yang mampu mengangkat beban berat ketika konstruksi dilakukan di lokasi
3	Pergantian bahan bakar disesuaikan dengan kondisi setiap unit PLTN dan tidak mempengaruhi operasi unit-unit PLTN lainnya.	Industri nasional akan semakin kecil jika dibangun di Indonesia karena hampir semua modul-modul sudah dipabrikasi di negara pembuat.
4	Waktu konstruksi lebih pendek	

daripada PLTN konvensional.
Yaitu kurang dari 3 tahun. Hal ini
dapat diwujudkan karena hampir
semua telah berbentuk modul-
modul yang siap untuk dirakit.



Gambar 2.3 Reaktor NuScale (Sadegh-Noedoost *et al.*, 2020).

Gambar 2.3 adalah reaktor NuScale yang terdiri dari *core*, *bypass channel*, *reflector*, *barrel* dan *RPV*. *Core* juga disebut dengan teras reaktor yaitu sebagai indikator panas pada reaktor, *bypass channel* berfungsi memuat kanal volume pendingin dan struktur panas, *reflector* berfungsi memantulkan beberapa neutron yang bocor ke *core* agar terus terjadi reaksi nuklir, *barrel* alat yang digunakan untuk menangkap *core* dan *reactor pressure vessel* (RPV) sebagai wadah tertutup penahan tekanan tinggi reaktor (Stacey, 2018).

2.3. Analisis Neutronik

Secara umum analisis PLTN dibagi menjadi dua bagian utama yaitu analisis neutronik dan analisis termal hidrolik. Analisis neutronik adalah tahap analisis yang berhubungan dengan perilaku neutron di dalam teras reaktor. Secara umum analisis ini membahas mengenai populasi neutron, faktor multiplikasi, distribusi sumber neutron dan distribusi daya.

2.3.1. Teori Transport Neutron dan Persamaan Difusi

Dalam teras reaktor terdapat keadaan neutron. Keadaan neutron meliputi populasi neutron, distribusi neutron, energi neutron, kerapatan neutron dan lain sebagainya. Neutron dalam reaktor mengalami tumbukan-hamburan dan karenanya neutron selalu berpindah-pindah tempat dari satu titik hamburan berikut berikutnya sampai akhirnya neutron mengalami reaksi serapan. Proses perpindahan neutron ini disebut proses transport. Persamaan umum difusi pada saat sistem dalam keadaan seimbang dapat dituliskan.

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{l} \text{laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{jumlah} \\ \text{neutron } (g) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{l} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{leakage} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{absorpsi}(g) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{sumber} \\ \text{neutron} \\ \text{dari} \\ \text{fisi } (g) \end{array} \right] \\ &\quad - \left[\begin{array}{l} \text{Neutron} \\ \text{hilang} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan } (g) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Neutron} \\ \text{masuk} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan } (g) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dengan indeks- g merupakan indeks grup 1,2,... g dimulai dari grup neutron yang mempunyai energi tertinggi sampai ke grup neutron dengan energi terendah. Tanda minus (-) menunjukkan jumlah neutron berkurang dan tanda plus (+) menunjukkan jumlah neutron yang bertambah (Duderstadt, 1976).

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} &= \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{ag} \phi_g + S_g \\ &\quad - \Sigma_{sg} \phi_g + \Sigma_{ag}, \Sigma_{sgg}, \phi_g \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dengan suku sumber neutron adalah sebagai berikut (Duderstadt, 1976).

$$S_g = \frac{x_g}{k_{eff}} \Sigma_g, v_g, \Sigma_{fg}, \phi_g \quad (2.3)$$

Perubahan neutron yang hilang disebabkan karena adanya penyerapan ataupun hamburan dapat digabungkan menjadi suku *removal* sebagai berikut (Duderstadt, 1976).

$$\Sigma_{Rg}\phi_g = \Sigma_{ag}\phi_g + \Sigma_{sg}\phi_g \dots\dots\dots (2.4)$$

dalam keadaan *steady state*:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2.5)$$

Sehingga persamaan difusi multigrup dapat dinyatakan sebagai berikut (Duderstadt, 1976).

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{Rg}\phi_g \dots\dots\dots (2.5) \\ & = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \Sigma_g v_g \Sigma_{fg} \phi_g + \Sigma_{ag} \Sigma_{sgg} \phi_g \end{aligned}$$

Keterangan:

- D : tetapan difusi
- Σ_i : penampang lintang makroskopik reaksi ke-i
- $v\Sigma_f$: probabilitas terjadinya reaksi per detik
- ϕ : fluks neutron yang bergantung ruang dan energi
- k_{eff} : faktor multiplikasi efektif
- $\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g$: suku kebocoran (*leakage*)
- S_g : sumber neutron
- $\Sigma_{ag}\phi_g$: suku absorpsi
- $\Sigma_{sg}\phi_g$: jumlah neutron yang masuk karena hamburan
- $\Sigma_{ag}, \Sigma_{sgg}, \phi_g$: jumlah neutron yang berkurang karena hamburan

2.4. Faktor Multiplikasi

Faktor multiplikasi (k) menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi dalam teras reaktor dimana keadaan stabil dapat tercapai bila nilai $k=1$ (Duderstadt, 1976).

Terdapat dua jenis faktor multiplikasi yaitu

- a. Faktor multiplikasi infinit (k_{∞})

Faktor multiplikasi infinit juga bisa dikenal sebagai empat faktor formula dan dapat didefinisikan sebagai berikut (Duderstadt, 1976).

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan

- k_{∞} : faktor multiplikasi infinit
- ϵ : faktor fisi cepat
- p : probabilitas tangkapan resonansi
- f : faktor pemanfaatan termal
- η : faktor reproduksi

- b. Faktor multiplikasi efektif (k_{eff})

Yaitu biasa disebut dengan faktor enam formula. Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) didefinisikan sebagai (Duderstadt, 1976):

$$k_{eff} = k_{\infty} P_{FNL} P_{TNL} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

- k_{eff} : faktor multiplikasi efektif
- P_{FNL} : kemungkinan neutron cepat tidak bocor

P_{TNL} : kemungkinan neutron termal tidak bocor

Berdasarkan faktor multiplikasi, terdapat tiga jenis kritikalitas reaktor yaitu kondisi subkritis ($k_{eff} < 1$) yang biasanya terjadi pada saat penurunan daya (jumlah reaksi fisi) reaktor, kondisi kritis ($k_{eff} = 1$) biasanya digunakan pada kondisi operasi dengan daya konstan, dan kondisi superkritis ($k_{eff} > 1$) yang biasanya terjadi pada saat kenaikan daya reaktor (Duderstadt, 1976).

2.5. Densitas Jumlah Atom

Densitas jumlah atom adalah jumlah atom per satuan volume dari suatu bahan atau dapat dihitung dari persamaan 2.8 (Holbert, 2014).

$$N = \frac{n}{V} = \frac{\rho N_A}{M} \dots\dots\dots (2.8)$$

ρ adalah densitas material dengan satuan (g/cm^3), M adalah berat atom atau molekul dan menggunakan bilangan avogadro ($N_A = 6,023 \times 10^{23}$ atom/mol).
Persamaan 2.9 untuk menghitung densitas atom campuran (Holbert, 2014).

$$N_{mix} = \frac{P_{mix} N_A}{M_{mix}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Densitas jumlah atom isotop i dapat diperoleh dari persamaan 2.10.

$$N_i = \frac{\rho_i N_A}{M_i} = \frac{\omega_i \rho_{elem} N_A}{M_i} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan

$$\rho_{elem} = \rho_{mat} \frac{M_{elem}}{M_i} \dots\dots\dots (2.11)$$

Berat atom dapat dihitung persamaan 2.12

$$\frac{1}{M_{elem}} = \sum \frac{\omega_i}{M_i} \dots\dots\dots (2.12)$$

2.6. Penelitian Terdahulu

Dalam membantu penelitian ini terdapat beberapa penelitian terdahulu sebagai acuan yang terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu (Penulis, 2021)

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	(Susyadi, Hendro Tjahyono, Sukmanto Dibyo, 2018)	Metode: Investasi Reaktor .NuScale menggunakan progam RELAP5 . Hasil: reaktor NuScale sifat keselamatan yang tetap.
2	(Pratama and Irwanto, 2017)	Metode: <i>Deterministic</i> untuk menyelesaikan persamaan difusi yang diaplikasikan pada software SRAC2006 yang dikembangkan oleh <i>Japan Atomic Energy Agency</i> (JAEA) dengan basis data nuklir yang digunakan adalah JENDL4.0 Hasil: Aspek neutronik pada reaktor HTGR dengan bahan bakar Plutonium lebih baik.
3	(Sadegh-Noedoost <i>et al.</i> , 2020a)	Metode: perhitungan neutronik inti dan pembakaran teras untuk menyelidiki panjang siklus pertama dengan metode Monte Carlo Hasil: panjang siklus pertama yaitu 730 hari.