

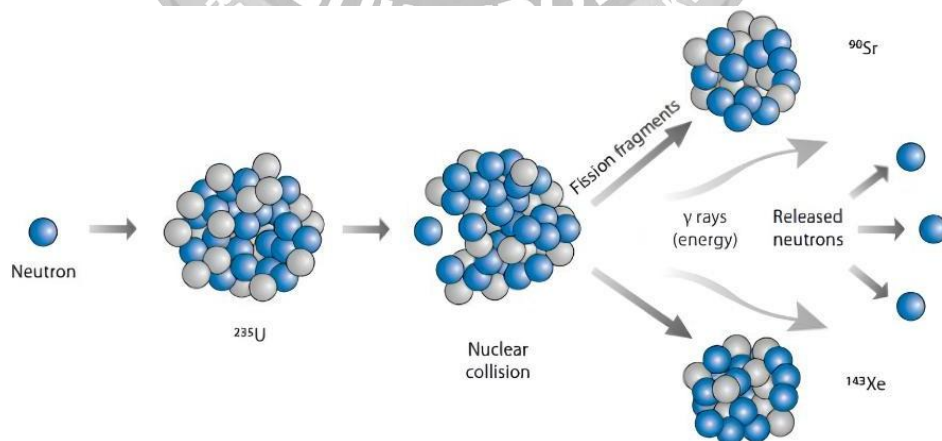
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Energi Nuklir

Nuklir berasal dari bahasa Latin "*nucleus*" yang berarti inti atom. Energi nuklir sendiri merupakan energi yang dihasilkan dari reaksi di dalam inti atom melalui dua jenis reaksi utama, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi (Bahari, Susiati, 2023; Susdarwono, 2021). Pada reaksi fisi yang ditunjukkan dalam Gambar 2.1, tampak bahwa proses tersebut melibatkan fisi dari isotop uranium (U^{235}). Reaksi fisi ini terjadi ketika sebuah neutron menabrak inti bahan bakar nuklir U^{235} , menghasilkan isotop U^{236} yang tidak stabil dan kemudian membelah menjadi dua inti yang lebih ringan serta dua atau tiga neutron dan energi sebesar 200 MeV (Iman Kuntoro et al., 2023). Neutron hasil reaksi fisi dapat memicu terjadinya reaksi fisi berantai (Maemunah et al., 2019).



Gambar 2.1 Reaksi Fisi Inti U^{235}

Sumber : (Maemunah et al., 2019)

Reaksi fisi menghasilkan inti hasil pembelahan atau produk fisi yang ukurannya hampir sama besar dan bersifat tidak stabil atau radioaktif. Inti-inti ini akan meluruh dengan memancarkan radiasi sampai mencapai keadaan yang lebih stabil (Iman Kuntoro, 2023). Selain itu, produk fisi

memiliki energi kinetik yang sangat tinggi, sehingga ketika berinteraksi dengan atom-atom di sekitarnya akan menyebabkan pemanasan bahan akibat *collision* yang terjadi (Maemunah et al., 2019). Energi panas yang dihasilkan dari reaksi nuklir digunakan untuk menghasilkan uap, yang kemudian menggerakkan turbin guna menghasilkan energi listrik (Han et al., 2015).

Neutron memainkan peran krusial dalam reaksi fisi, tidak hanya sebagai pemicu reaksi tetapi juga melalui interaksi kompleks dengan inti atom di sekitarnya. Interaksi ini dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu serapan dan hamburan.

- a. Serapan atau absorpsi, neutron dapat mengalami beberapa jenis reaksi. Salah satunya adalah reaksi fisi (n, f) , di mana neutron diserap oleh inti berat yang kemudian mengalami pembelahan dan menghasilkan lebih banyak neutron dan energi. Selain itu, tangkapan (n, γ) terjadi ketika neutron diserap oleh inti, menghasilkan inti yang lebih berat dan memancarkan foton gamma. Neutron juga dapat menyebabkan emisi partikel bermuatan, seperti proton atau partikel alpha (n, p) dan (n, α) , atau emisi neutron tambahan tanpa menyebabkan fisi lebih lanjut (n, xn) (Syarip, 2019).
- b. Hamburan atau *scattering* mencakup interaksi di mana neutron bertumbukan dengan inti atom tanpa diserap langsung. Pada hamburan elastik, neutron memantul dari inti dan mentransfer sebagian energinya ke inti tersebut, sehingga energinya berkurang, sedangkan hamburan inelastik diikuti dengan emisi foton gamma (γ) terjadi ketika neutron menyebabkan inti bergetar atau melompat ke tingkat energi lebih tinggi, kemudian memancarkan foton gamma saat kembali ke keadaan stabil (Syarip, 2019).

Peristiwa interaksi neutron dengan inti atom dapat dikuantifikasikan dengan menggunakan konsepampang lintang (Syarip, 2019). Ampang lintang merupakan probabilitas terjadinya interaksi antara neutron dan inti atom, di mana besarnya tergantung pada jenis bahan dan dengan neutron

yang datang (Syarip, 2019). Tampang lintang ini, yang disimbolkan dengan σ (sigma), memiliki satuan luas yang berkisar antara 10^{-22} hingga 10^{-26} m^2 , sering dinyatakan dalam satuan barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Untuk menghitung probabilitas interaksi neutron dengan material secara keseluruhan digunakan konsep penampang lintang makroskopis, Σ (sigma besar), yang memiliki satuan cm^{-1} dan dinyatakan sebagai (Iman Kuntoro et al., 2023) :

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.1)$$

di mana N adalah kerapatan atau densitas bahan nuklida.

Selain itu, jenis interaksi antara neutron dengan material yang dilaluinya dapat dijelaskan secara matematis melalui penampang lintang sebagai berikut (Iman Kuntoro et al., 2023):

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = (\sigma_{se} + \sigma_{si}) + (\sigma_c + \sigma_f) \quad (2.2)$$

di mana :

σ_t adalah penampang lintang total,

σ_s adalah penampang lintang hamburan,

σ_a adalah penampang lintang serapan,

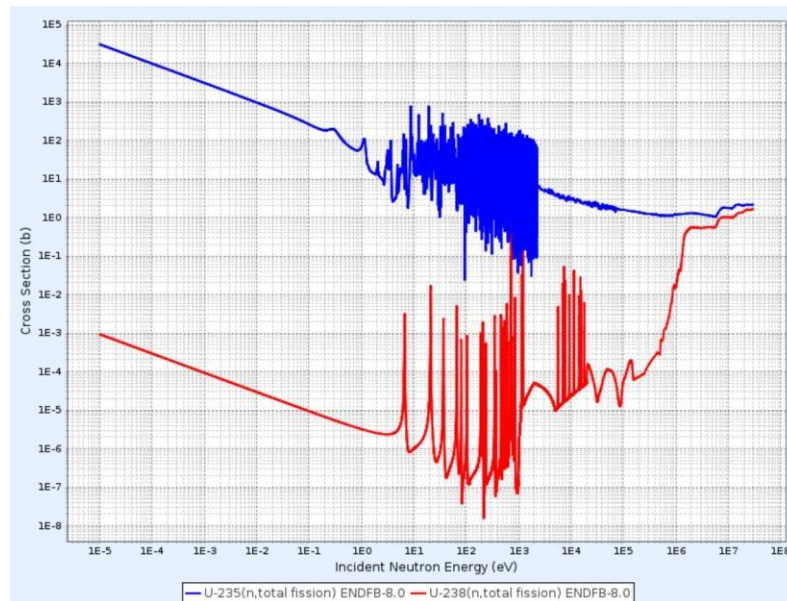
σ_{se} adalah penampang lintang hamburan elastis,

σ_{si} adalah penampang lintang hamburan inelastis,

σ_c adalah penampang lintang serapan murni, dan

σ_f adalah penampang lintang fisi.

Nilai penampang lintang dipengaruhi oleh energi neutron yang menumbuk, dengan perubahan yang signifikan tergantung pada interaksi antara neutron dan inti material.

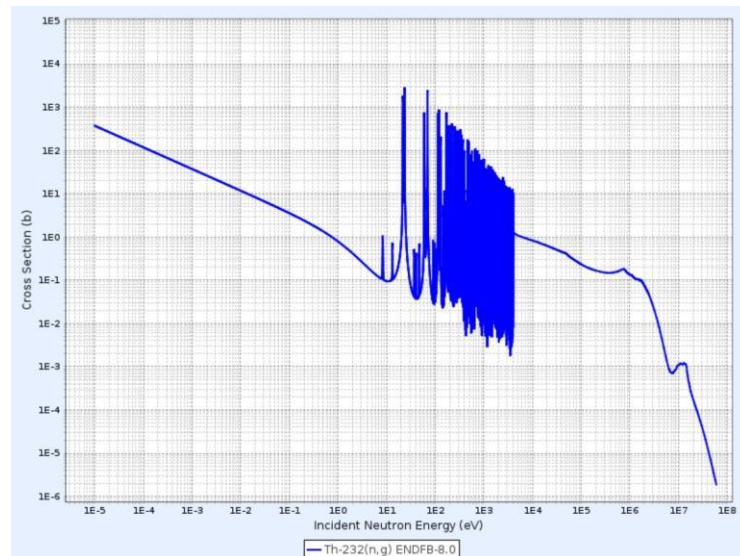


Gambar 2.2 Tampang Lintang Fisi U^{235} dan U^{238}

Sumber : <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=2#>

Tangkapan penampang lintang fisi untuk isotop U^{235} dan U^{238} dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pada U^{235} menunjukkan nilai energi yang lebih besar untuk neutron termal dibandingkan dengan neutron cepat. Sebaliknya, U^{238} memiliki penampang lintang fisi yang jauh lebih kecil pada energi neutron termal, namun meningkat pada neutron cepat. Selain tampang lintang fisi, ada juga tampang lintang penangkapan neutron (*capture*), yang menggambarkan probabilitas sebuah neutron yang akan ditangkap oleh inti atom tanpa menyebabkan pembelahan (fisi). Dalam proses *capture* ini, neutron yang ditangkap oleh inti atom menyebabkan perubahan dalam komposisi atau keadaan inti yang sering kali menghasilkan isotop baru.

Dapat dilihat pada Gambar 2.3 tampang lintang *capture* Th^{232} pada neutron energi rendah (neutron termal) cukup tinggi sehingga membuatnya efektif pada reaktor termal. Namun, seiring dengan meningkatnya energi neutron, tampang lintang *capture* ini cenderung menurun, yang berarti bahwa inti Th^{232} menjadi kurang efisien dalam menangkap neutron.

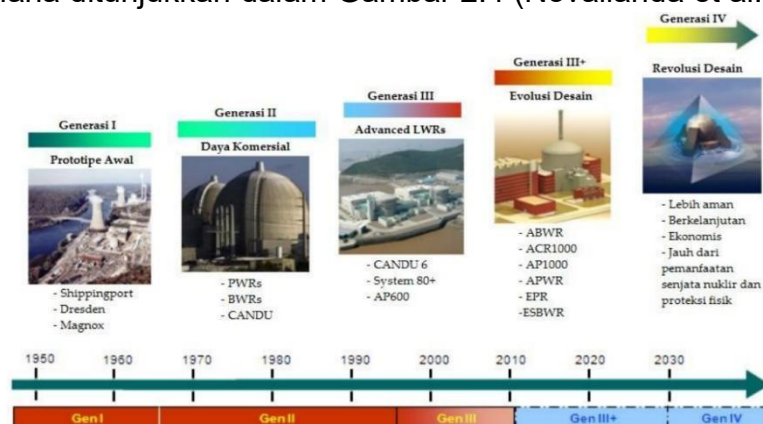


Gambar 2.3 Tampang Lintang Capture Th^{232}

Sumber : <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=2#>

2.1.2 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir mulai dikembangkan sebagai sumber energi alternatif pada awal 1950-an, merupakan perangkat kompleks yang dirancang untuk mengendalikan reaksi fisi berantai dalam inti atom. Reaksi ini menghasilkan energi dalam jumlah besar yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, salah satunya dalam pembangkitan listrik. Sejak awal pengembangannya, teknologi reaktor nuklir telah berkembang pesat melalui beberapa generasi, dimulai dari Generasi I hingga Generasi IV, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.4 (Novalianda et al., 2020)

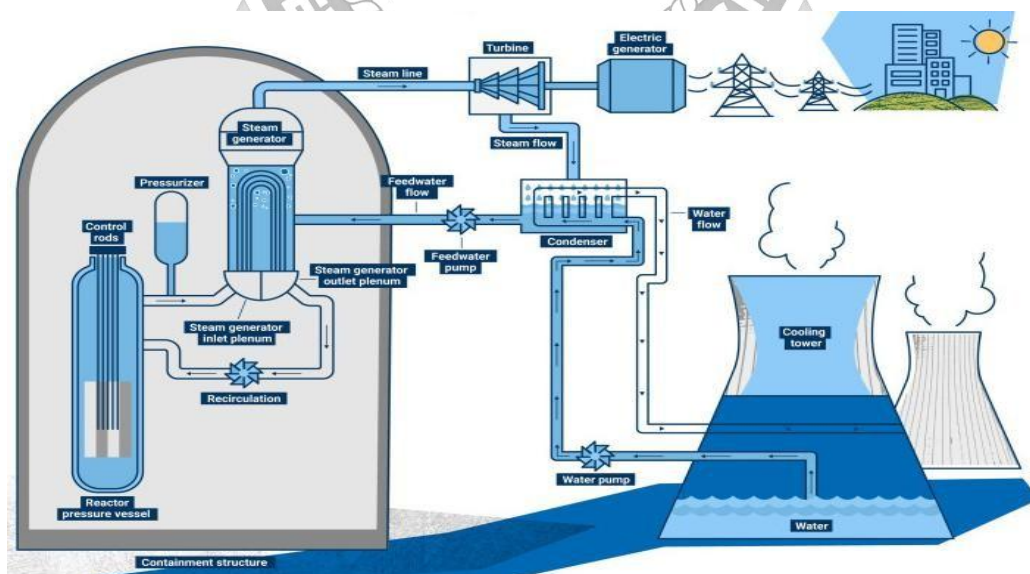


Gambar 2.4 Evolusi Reaktor Nuklir

Sumber : Anggoro et al., 2013

Reaktor Generasi IV menawarkan berbagai keuntungan, termasuk keberlanjutan dengan menyediakan energi bersih dan meminimalkan limbah nuklir, efisiensi ekonomi melalui biaya operasional yang rendah, serta peningkatan keselamatan dengan mengurangi risiko kerusakan inti reaktor. Selain itu, reaktor ini juga memperkuat pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik terhadap terorisme sehingga menjadikannya solusi energi yang aman, efisien, dan berkelanjutan (Anggoro et al., 2013).

Reaktor nuklir pada dasarnya merupakan instalasi yang mengendalikan reaksi fisi, di mana inti atom berat seperti U_{235} dibelah menjadi inti yang lebih ringan melalui penembakan neutron (Liliana Yetta Pandi, 2019; Santiani, 2011). Keberhasilan operasional reaktor nuklir bergantung pada berbagai komponen penting yang bekerja secara sinergis. Komponen umum reaktor nuklir dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Komponen Umum Reaktor Nuklir

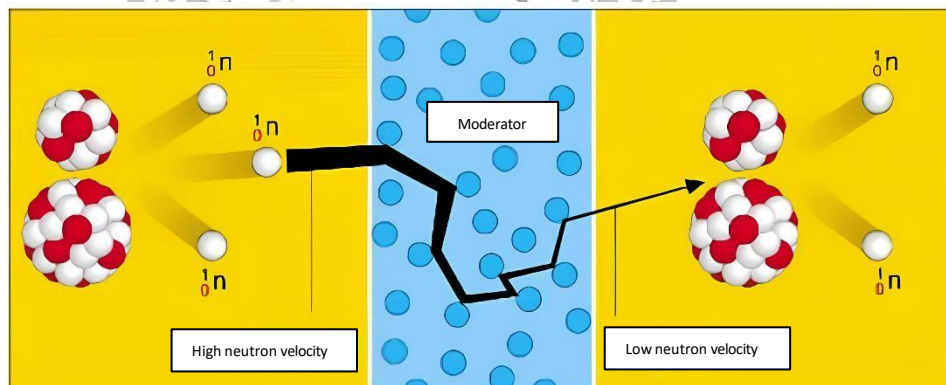
Sumber : Graphic: A. Vargas/IAEA

Komponen umum pada reaktor nuklir dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Bahan bakar adalah material yang digunakan dalam reaktor nuklir untuk mempertahankan reaksi fisi berantai (Iman Kuntoro, 2023). Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir, yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan

fisil adalah unsur atau atom yang dapat langsung mengalami pembelahan ketika terkena neutron, sedangkan bahan fertil adalah unsur atau atom yang setelah menangkap neutron tidak langsung membelah tetapi membentuk bahan fisil yang kemudian dapat mengalami reaksi fisi (Santiani, 2011).

- b. Pendingin reaktor berfungsi sebagai media untuk menyerap panas yang dihasilkan dari proses fisi dalam elemen bahan bakar, kemudian memindahkannya atau melepaskannya ke lingkungan melalui sistem penukar panas.
- c. Moderator merupakan bahan yang berfungsi untuk memperlambat neutron cepat. Dalam reaksi fisi, akan dihasilkan neutron cepat dimana energinya perlu dikurangi menjadi energi termal dengan kecepatan rendah (neutron termal) agar dapat melanjutkan reaksi fisi berikutnya, sebagaimana terlihat dalam Gambar 2.6 (Iman Kuntoro et al., 2023).



Gambar 2.6 Moderasi Neutron Cepat Oleh Material Moderator

Sumber : <https://www.euronuclear.org/glossary/moderator/>

- d. Reflektor adalah material yang dirancang untuk memantulkan neutron yang berpotensi keluar dari teras reaktor, mengembalikannya ke dalam teras (Iman Kuntoro, 2023). Fungsi utama reflektor ini adalah mengurangi kebocoran neutron melalui proses hamburan, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor (Iman Kuntoro et al., 2023). Dalam desain MSR, pemilihan material reflektor memerlukan perhatian khusus karena karakteristik bahan

bakar berupa garam cair yang korosif serta kondisi operasi bersuhu tinggi. Oleh karena itu, material reflektor dalam MSR harus memiliki ketahanan terhadap korosi, kestabilan kimia, dan integritas struktural pada suhu tinggi. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi ketebalan dan jenis material reflektor, termasuk grafit, Berilium-9 (Be^9), Berilium Karbida (Be_2C), dan Tembaga (Cu), dengan ketebalan bervariasi dari $0,2R$ hingga R ($R = 100 \text{ cm}$), terhadap performa neutronik reaktor.

Beberapa material reflektor yang bisa digunakan antara lain:

- Berilium efektif digunakan sebagai moderator dan reflektor dalam reaktor nuklir karena memiliki penampang lintang penyerapan neutron yang rendah, kemampuan tinggi dalam memantulkan neutron, konduktivitas termal yang baik, serta ketahanan terhadap suhu tinggi (Hausner, 1963). Selain digunakan secara tunggal, berilium juga sering dikombinasikan dengan material lain dalam berbagai aplikasi reaktor. Salah satu alternatifnya adalah Be_2C , yang menawarkan ketahanan terhadap lingkungan bersuhu ekstrem dan karakteristik reflektif neutron yang baik. Sifat-sifat tersebut menjadikan Be_2C cocok digunakan sebagai reflektor dalam desain reaktor suhu tinggi seperti MSR (ORNL, 2014).
- Grafit merupakan material reflektor yang sangat efektif dalam memantulkan neutron termal karena memiliki penampang lintang penyerapan yang rendah, stabilitas dimensi yang baik, serta struktur mikro yang mendukung ketahanan terhadap iradiasi neutron jangka panjang (Karpaska et al., 2020). Selain itu, grafit memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan koefisien ekspansi termal yang rendah, sehingga mampu mempertahankan bentuk dan kinerjanya tanpa mengalami deformasi signifikan pada suhu tinggi hingga di atas 1600°C (Zhao et al., 2023).

Dalam aplikasi reaktor, grafit yang digunakan bukan grafit biasa, melainkan jenis khusus yang disebut sebagai grafit kelas nuklir (*nuclear-grade graphite*), yang diproses dan diseleksi dengan standar teknis yang ketat. Grafit jenis ini memiliki densitas tinggi dan porositas rendah untuk menjamin efisiensi pemantulan neutron serta meminimalkan degradasi struktur akibat iradiasi berkepanjangan (Idaho National Laboratory, 2019). Selain itu, grafit kelas nuklir dirancang agar memiliki ketahanan terhadap perubahan dimensi yang diinduksi oleh fluensa neutron tinggi, serta stabil terhadap suhu ekstrem yang terjadi dalam operasi reaktor. Sifat mekanik seperti kekuatan tekan dan modulus elastisitas juga dikendalikan agar mampu mempertahankan integritas struktural, meskipun grafit secara alami bersifat getas (Liu et al., 2017; Marsden et al., 2016). Kombinasi sifat neutronik dan ketahanan terhadap kondisi ekstrem ini menjadikan grafit sebagai salah satu material reflektor paling andal dan banyak digunakan dalam desain reaktor nuklir generasi lanjut.

- Tembaga memiliki konduktivitas termal yang sangat tinggi, sehingga mampu mendistribusikan panas secara efisien di sekitar teras reaktor. Meskipun memiliki penampang lintang penyerapan neutron yang lebih besar dibandingkan material reflektor lainnya, tembaga tetap dipertimbangkan sebagai reflektor sekunder karena ketahanan korosinya yang baik (Merk et al., 2021).
- e. Batang kendali (*control rod*) merupakan komponen penting dalam sistem pengendalian reaktivitas reaktor nuklir. Fungsi utama batang kendali adalah menyerap neutron berlebih sehingga reaktor tetap dalam kondisi kritis atau subkritis secara terkendali. Efektivitas batang kendali dalam mengatur reaktivitas ini diukur melalui parameter yang dikenal sebagai *Control Rod Worth* atau nilai reaktivitas batang kendali. Nilai ini menunjukkan seberapa besar perubahan reaktivitas reaktor akibat

pergerakan batang kendali, baik dalam persen $\Delta k/k$ maupun satuan pcm (*percent mille*) (Lamarsh & Baratta, 2001).

Material yang umum digunakan sebagai penyerap neutron dalam batang kendali di antaranya adalah Boron Carbide (B_4C), hafnium (Hf), kadmium (Cd), serta beberapa isotop tanah jarang lainnya. Secara khusus, B_4C memiliki keunggulan dalam penyerapan neutron termal karena kandungan isotop B^{10} yang sangat tinggi. Selain itu, B_4C juga dikenal memiliki kestabilan kimia dan termal yang baik sehingga sering digunakan di berbagai jenis reaktor nuklir, terutama dalam lingkungan operasi suhu tinggi dan lingkungan korosif seperti pada MSR (Todreas & Kazimi, 2011; IAEA, 2021).

Dalam konteks desain reaktor berbasis garam cair seperti MSR, pemilihan material batang kendali memerlukan pertimbangan tambahan, terutama aspek ketahanan terhadap korosi akibat kontak langsung dengan media garam cair pada suhu tinggi. Oleh sebab itu, penggunaan material seperti B_4C banyak dipilih karena ketahanan korosi dan performa neutroniknya yang baik untuk penggunaan jangka panjang di lingkungan reaktor garam cair.

Evaluasi *Control Rod Worth* yang akurat merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan dan keselamatan operasi reaktor nuklir, terutama dalam menentukan kemampuan reaktor untuk menghadapi berbagai skenario operasional yang mungkin terjadi selama siklus bahan bakar berlangsung (Lamarsh & Baratta, 2001).

- f. *Shielding* berfungsi untuk menghalangi, meredam, atau menyerap radiasi yang dihasilkan dari teras reaktor, sehingga radiasi tersebut tidak keluar dari sistem reaktor. Mengingat reaktor nuklir memancarkan radiasi yang sangat intens, diperlukan *shielding* yang sangat efektif untuk menahan berbagai jenis radiasi, seperti neutron, sinar gamma, dan partikel bermuatan. *Shielding* ini dirancang untuk melindungi lingkungan dan personel, menjaga keselamatan operasional reaktor,

dan mengurangi risiko radiasi terhadap kesehatan manusia dan keselamatan publik (Santiani, 2011).

2.1.3 *Micro Molten Salt Reactor*

Molten Salt Reactor (MSR) adalah salah satu jenis reaktor nuklir yang memanfaatkan garam cair sebagai bahan pendingin sekaligus bahan bakar. MSR termasuk dalam enam desain reaktor nuklir Generasi IV yang diusulkan dalam Forum Generasi IV, di mana teknologi ini dipromosikan karena keunggulannya dalam aspek keselamatan, efisiensi, dan fleksibilitas operasional (Prasetyo et al., 2019; Wang et al., 2023b). Bahan bakar dalam MSR, seperti uranium atau thorium, dilarutkan dalam garam cair yang biasanya terdiri dari florida atau klorida, berfungsi sebagai pendingin yang mengalirkan panas sekaligus sebagai media bahan bakar (Roper et al., 2022). Keunggulan utama MSR adalah kemampuannya untuk beroperasi pada suhu tinggi dengan tekanan rendah, meningkatkan efisiensi termal dan keamanan (Mignacca & Locatelli, 2020; Thomas et al., 2021)

Sistem bahan bakar cair dalam MSR memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan bahan bakar padat pada reaktor konvensional. Salah satu keunggulan utamanya adalah tingginya koefisien ekspansi termal, yang menghasilkan koefisien reaktivitas suhu negatif. Karena bahan bakar berbentuk cair, peningkatan suhu akan membuatnya mengembang dan secara alami memperlambat laju reaksi nuklir. Ini menjadikan MSR bersifat *self regulating*, memungkinkan reaktor mempertahankan stabilitas dan keamanan tanpa memerlukan banyak intervensi aktif dalam pengendalian reaktivitas (Serp et al., 2014).

Selain itu, gas-gas fisi seperti xenon dapat dilepaskan secara kontinu dari bahan bakar cair, mengurangi kebutuhan akan penghentian operasi reaktor untuk mengatasi penumpukan gas yang dapat menghambat reaksi nuklir. Dengan adanya koefisien suhu dan void negatif, peningkatan suhu akan secara otomatis menurunkan reaktivitas, memastikan keamanan dalam berbagai kondisi operasi (LeBlanc, 2010). Disamping memiliki fitur keselamatan pasif, MSR juga mengurangi risiko kegagalan *meltdown*.

Dalam kondisi darurat, bahan bakar dapat secara otomatis dialirkan ke tangki penampung yang aman dan didinginkan secara pasif, memastikan penghentian operasi yang aman tanpa risiko pelelehan bahan bakar. Garam cair sebagai pendingin memiliki titik didih yang sangat tinggi, memungkinkan reaktor beroperasi pada tekanan rendah tanpa memerlukan bejana tekan yang tebal. Dengan tidak adanya air atau natrium dalam inti reaktor menghilangkan risiko ledakan uap atau pembentukan hidrogen, masalah yang sering dihadapi dalam desain reaktor air ringan (LeBlanc, 2010).

Penelitian ini mengacu pada model desain MSR dengan kapasitas daya termal 25 MWt. Desain ini disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan energi di wilayah terpencil dan area yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional. Dalam penelitian ini, sistem pengendalian reaktivitas dan sarana *shutdown* menggunakan batang kendali serta memanfaatkan *burnable poison* dan *fuel drain tank*. Penggunaan *burnable poison* sebagai bagian dari strategi pengendalian reaktivitas memberikan fleksibilitas tambahan, karena memungkinkan penyesuaian reaktivitas yang lebih halus sepanjang siklus bahan bakar. *Fuel drain tank* berfungsi sebagai mekanisme yang efektif untuk mengalirkan bahan bakar cair dalam keadaan darurat, memastikan bahwa reaktor dapat beroperasi dengan aman dan terkendali, bahkan dalam situasi yang tidak diinginkan.

2.1.4 Faktor Multipikasi Efektif (K_{eff})

Besaran fisika yang menunjukkan keadaan reaktor dan menggambarkan kemungkinan terjadinya reaksi fisi berantai disebut faktor multiplikasi dan dilambangkan dengan simbol k (Iman Kuntoro et al., 2023). Dalam sistem reaktor dengan ukuran tertentu, yang memungkinkan terjadinya kebocoran neutron ke luar sistem, faktor multiplikasi yang digunakan adalah faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), yang dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara laju produksi neutron (n_p), laju serapan neutron (n_s), dan laju kebocoran neutron (n_k), seperti yang dirumuskan dalam persamaan 2.3 (Syarip, 2019).

$$k = k_{\text{eff}} = \frac{n_p}{n_s + n_k} \quad (2.3)$$

Kondisi reaktor dapat dijelaskan sebagai berikut:

Untuk $k = 1$, jumlah neutron tetap stabil, dan kondisi reaktor disebut kritis.

Untuk $k > 1$, jumlah neutron meningkat, dan kondisi reaktor disebut superkritis.

Untuk $k < 1$, jumlah neutron menurun, dan kondisi reaktor disebut subkritis.

Nilai faktor multiplikasi reaktor dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain (Iman Kuntoro et al., 2023):

- Jumlah bahan bakar : semakin banyak bahan bakar dalam teras, maka k akan meningkat, sedangkan semakin sedikit bahan bakar, maka k akan menurun.
- Posisi batang kendali : ketika batang kendali (yang berfungsi sebagai bahan penyerap neutron) dijauhkan, k meningkat, dan ketika batang kendali didekatkan, k menurun.
- Perubahan suhu dan tekanan di teras reaktor.

2.1.5 Reaktivitas Reaktor Nuklir dan Koefisien Reaktivitas

Dalam pengoperasian reaktor, kondisi kekritisian dinyatakan dengan reaktivitas, yang dilambangkan dengan ρ (Syarip, 2019). Reaktivitas menunjukkan perubahan populasi neutron pada setiap generasi dan membantu memprediksi fluks neutron dalam reaktor. Jika terdapat n_0 neutron pada generasi sebelumnya dan $n_0 k_e$ neutron pada generasi berikutnya, maka perubahan populasi neutron dapat dituliskan ke dalam persamaan 2.4 (Iman Kuntoro et al., 2023) :

$$\rho = \frac{(n_0 k_e - n_0)}{n_0 k_e} = \frac{k_e - 1}{k_e} \quad (2.4)$$

Hubungan antara reaktivitas dan faktor multiplikasi dapat diuraikan sebagai berikut :

Untuk $k_{\text{eff}} = 1$, reaktor berada dalam kondisi kritis, dengan nilai $\rho = 0$

Untuk $k_{eff} < 1$, reaktor dalam kondisi subkritis, dengan nilai $\rho < 0$ (negatif).

Untuk $k_{eff} > 1$, reaktor dalam kondisi superkritis, dengan nilai $\rho > 0$ (positif).

Semakin besar nilai mutlak reaktivitas reaktor, semakin jauh kondisinya dari keadaan kritis, baik dalam kondisi subkritis maupun superkritis, sehingga reaktivitas menjadi ukuran yang tepat untuk menunjukkan seberapa jauh reaktor dari kondisi kritis. Setiap bagian teras reaktor memiliki nilai reaktivitas yang berbeda, misalnya bahan bakar memiliki reaktivitas positif sedangkan batang kendali memiliki reaktivitas negatif. Ketika bahan bakar dengan reaktivitas positif dikeluarkan dari teras, reaktivitasnya menjadi negatif, sementara batang kendali yang memiliki reaktivitas negatif akan memberikan reaktivitas positif saat ditarik keluar. Penambahan reaktivitas positif akan meningkatkan fluks neutron, sedangkan penambahan reaktivitas negatif akan menurunkannya (Iman Kuntoro et al., 2023).

Reaktivitas teras reaktor dapat mengalami perubahan selama operasi pada daya tetap dalam jangka waktu yang lama, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti peningkatan suhu, perubahan tekanan sistem pendingin, akumulasi nuklida hasil fisi, dan berkurangnya jumlah bahan bakar dalam teras. Perubahan ini diukur melalui koefisien reaktivitas yang mencerminkan seberapa besar perubahan reaktivitas akibat perubahan setiap satuan parameter operasi reaktor (Iman Kuntoro et al., 2023). Koefisien reaktivitas dapat bernilai positif atau negatif, bergantung pada respons reaktivitas terhadap perubahan kondisi tersebut. Misalnya, jika reaktivitas menurun ketika suhu moderator meningkat, koefisien ini bernilai negatif. Sebaliknya, jika reaktivitas bertambah dengan meningkatnya suhu, maka koefisien tersebut bernilai positif. Prinsip ini berlaku untuk berbagai parameter operasional lainnya, yang keseluruhannya berperan penting dalam menjaga operasi reaktor yang aman dan stabil. Berikut merupakan

koefisien reaktivitas yang memainkan peran penting dalam pengoperasian reaktor:

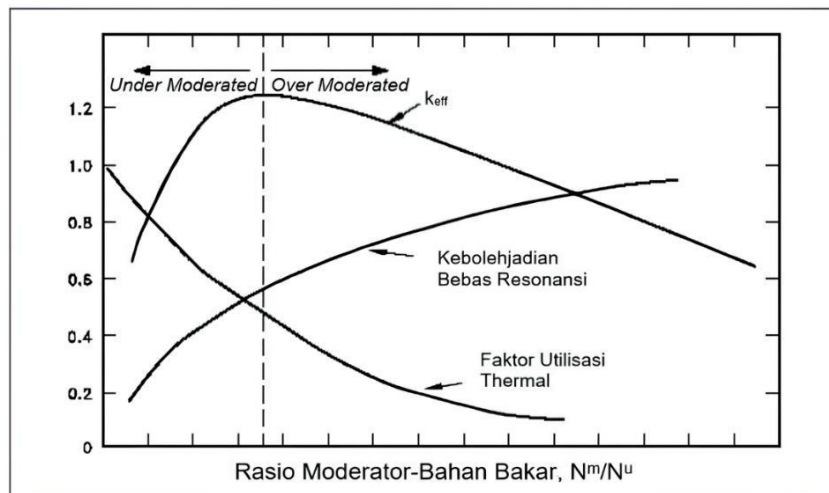
a. Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar

Koefisien reaktivitas suhu pada teras reaktor meliputi koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dan suhu moderator (Iman Kuntoro et al., 2023). Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar mengacu pada perubahan reaktivitas di dalam teras reaktor yang disebabkan oleh perubahan suhu bahan bakar. Secara umum, koefisien suhu bahan bakar bernilai negatif karena suhu bahan bakar akan langsung meningkat seiring dengan peningkatan daya reaktor (Rohman, 2009). Sementara itu, kenaikan suhu pada moderator terjadi dengan jeda dalam hitungan detik karena memerlukan waktu untuk perpindahan panas dari bahan bakar ke moderator. Oleh karena itu, koefisien reaktivitas suhu bahan bakar memiliki dampak yang jauh lebih besar dan respons yang lebih cepat dibandingkan dengan koefisien reaktivitas suhu moderator (Iman Kuntoro et al., 2023).

Koefisien ini juga dikenal sebagai koefisien reaktivitas Doppler bahan bakar, hal ini disebabkan karena adanya pengaruh efek Doppler pada reaktor termal, yang sering juga disebut Doppler *broadening*. Efek Doppler terjadi karena adanya pelebaran penyerapan neutron di sekitar puncak resonansi.

b. Koefisien Reaktivitas Suhu Moderator

Koefisien reaktivitas suhu moderator merupakan parameter yang penting dalam desain, kontrol, dan keselamatan reaktor. Koefisien reaktivitas suhu moderator merupakan perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh perubahan suhu moderator (Tukiran, 2007). Koefisien ini dipengaruhi oleh rasio antara moderator dan bahan bakar (*moderator-to-fuel ratio*) (Iman Kuntoro et al., 2023).



Gambar 2.7 Efek Over dan Under Moderated pada Nilai K_{eff}

Sumber : (Iman Kuntoro et al., 2023)

Pada reaktor yang mengalami kondisi di bawah moderasi (*under moderated*), seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.7, peningkatan suhu moderator mengakibatkan penurunan kerapatan moderator di teras, yang kemudian memperbesar reaktivitas negatif. Dengan demikian, reaktor dalam keadaan ini memiliki koefisien suhu moderator negatif (Iman Kuntoro et al., 2023).

c. Koefisien Reaktivitas *Void*

Koefisien reaktivitas *void* adalah suatu besaran dari perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh perubahan volume *void* dibandingkan dengan volume air dalam teras reaktor, yang dinyatakan dalam satuan persen (Suparlina, Budiono, Mardha, & Tukiran, 1998). Efek *void* pada reaktivitas tergantung pada posisinya dalam teras. Nilai koefisien ini dapat bersifat positif atau negatif tergantung pada desain teras reaktor. Nilai negatif menunjukkan bahwa peningkatan *void* akan mengurangi reaktivitas teras, yang merupakan kondisi yang diinginkan untuk memastikan keselamatan reaktor. Sebaliknya, nilai positif menunjukkan bahwa peningkatan *void* dapat meningkatkan reaktivitas, yang harus dihindari karena dapat menyebabkan transien reaktivitas yang tidak diinginkan (Liliana Yetta Pandi, 2019; Muhammad Ilham, 2016).

2.1.6 Fraksi Bakar (*Burn Up*)

Fraksi bakar, yang juga dikenal dengan istilah *burn up* merupakan parameter penting dalam pengoperasian reaktor nuklir. Ini menggambarkan seberapa banyak energi yang telah dilepaskan oleh bahan bakar nuklir selama siklus operasionalnya serta seberapa banyak isotop bahan bakar yang telah mengalami deplesi. Secara teknis, fraksi bakar didefinisikan sebagai jumlah energi fisi yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar (Iman Kuntoro et al., 2023).

Fraksi bakar biasanya dinyatakan dalam satuan MWd/t (megawatt-hari) per ton bahan bakar, yang memberikan gambaran tentang total energi yang dihasilkan oleh setiap ton bahan bakar dalam reaktor. Selain itu, fraksi bakar juga sering dinyatakan dalam bentuk persentase, yang menunjukkan seberapa besar jumlah atom bahan bakar yang telah habis terbakar melalui reaksi fisi dibandingkan dengan jumlah atom total pada awal siklus bahan bakar (Iman Kuntoro et al., 2023).

2.1.7 *Burnable Poison*

Burnable poison yang juga dikenal sebagai racun neutron yang dapat terbakar yaitu merupakan material yang dimasukkan ke dalam inti reaktor nuklir dan terdiri dari inti yang tidak dapat dibelah tetapi memiliki penampang serapan neutron yang besar. Seiring berjalannya waktu, jumlah *burnable poison* akan berkurang, sehingga pengaruhnya terhadap reaktivitas juga menurun (Evans et al., 2022). *Burnable poison* menawarkan berbagai manfaat, seperti pengendalian reaktivitas untuk memperpanjang siklus bahan bakar, produksi tritium, dan pembakaran radionuklida berumur panjang dari bahan bakar nuklir bekas (D. Lanning, 2002; E.P. Naessens, 2006).

Burnable poison dapat diterapkan dalam bahan bakar nuklir baik melalui distribusi homogen, di mana *burnable poison* tersebar merata di dalam bahan bakar, atau dalam bentuk distribusi heterogen seperti dalam bentuk mikrosfer atau silinder (Mahbuba Nabila & Hossain Sahadath, 2022; Talamo, 2006). Pada distribusi homogen, *burnable poison* dicampurkan

langsung ke dalam bahan bakar, sedangkan dalam distribusi heterogen, material ditempatkan sebagai lapisan di sekitar bahan bakar atau sebagai struktur yang terpisah.

Beberapa contoh *burnable poison* yang sering digunakan dalam reaktor nuklir antara lain erbium, gadolinium, dan iridium. Erbium unggul sebagai alternatif *burnable poison* karena penampang serapan neutron termalnya yang lebih rendah dibandingkan dengan gadolinium serta memberikan kinetika konsumsi yang lebih lambat dan kendali reaktivitas yang lebih stabil dalam jangka panjang (Porta et al., 2001). Di sisi lain, gadolinium memiliki penampang serapan yang sangat besar berperan dalam menekan reaktivitas awal dan mendukung pengendalian reaktivitas yang lebih stabil pada siklus reaktor berikutnya (Talamo, 2006). Iridium, meskipun lebih moderat dari gadolinium, memiliki penampang lintang yang cukup besar dan stabil terhadap suhu serta iradiasi tinggi sehingga menjadikannya efektif menurunkan reaktivitas dengan tetap menjaga kestabilan struktur bahan bakar selama siklus operasi (Sultan J. A., 2020)

2.1.8 OpenMc

Dalam penelitian berbasis simulasi neutronik, pemilihan perangkat lunak yang akurat dan fleksibel sangat penting untuk mendukung analisis performa reaktor. Salah satu perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah OpenMC, yaitu kode simulasi berbasis open source yang menggunakan metode Monte Carlo untuk menghitung interaksi neutron dalam reaktor. OpenMC memungkinkan pemodelan geometri reaktor menggunakan pendekatan Constructive Solid Geometry (CSG), yaitu membangun bentuk reaktor dari gabungan bangun dasar seperti silinder dan kubus. (OpenMC, n.d.).

Salah satu keunggulan utama OpenMC adalah interface pemrograman Python dan C/C++ yang lengkap dan dapat diperluas. *Interface* ini memfasilitasi berbagai tugas, seperti pemrosesan sebelum dan sesudah simulasi, pembuatan penampang multigrup, otomatisasi alur kerja, perhitungan deplesi, integrasi multifisika, serta visualisasi geometri dan

hasil *tally*. Selain *solver* transportasi inti Monte Carlo dan API-nya, OpenMC juga menyediakan *interface* berbasis Python untuk data nuklir yang memungkinkan pengguna tingkat lanjut untuk memeriksa, memodifikasi, dan memproses data nuklir dari file ENDF, ACE, dan HDF5 (OpenMC, n.d.).



2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

No	Penulis, Tahun	Judul	Metode	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	(Alsufyani et al., 2025)	<i>Investigating the possibility of using iridium as a burnable absorber in new fuel pellet designs of VVER-1200 for reactivity management</i>	Simulasi dilakukan menggunakan kode MCNPX	Penggunaan iridium sebagai <i>burnable poison</i> efektif dalam mengendalikan reaktivitas selama siklus operasi reaktor. Iridium mampu menurunkan nilai k_{eff} awal dan menjaga kestabilan reaktivitas.	Menggunakan variasi <i>burnable poison</i> untuk mengendalikan reaktivitas.	Jenis reaktor dan parameter yang dianalisis berbeda

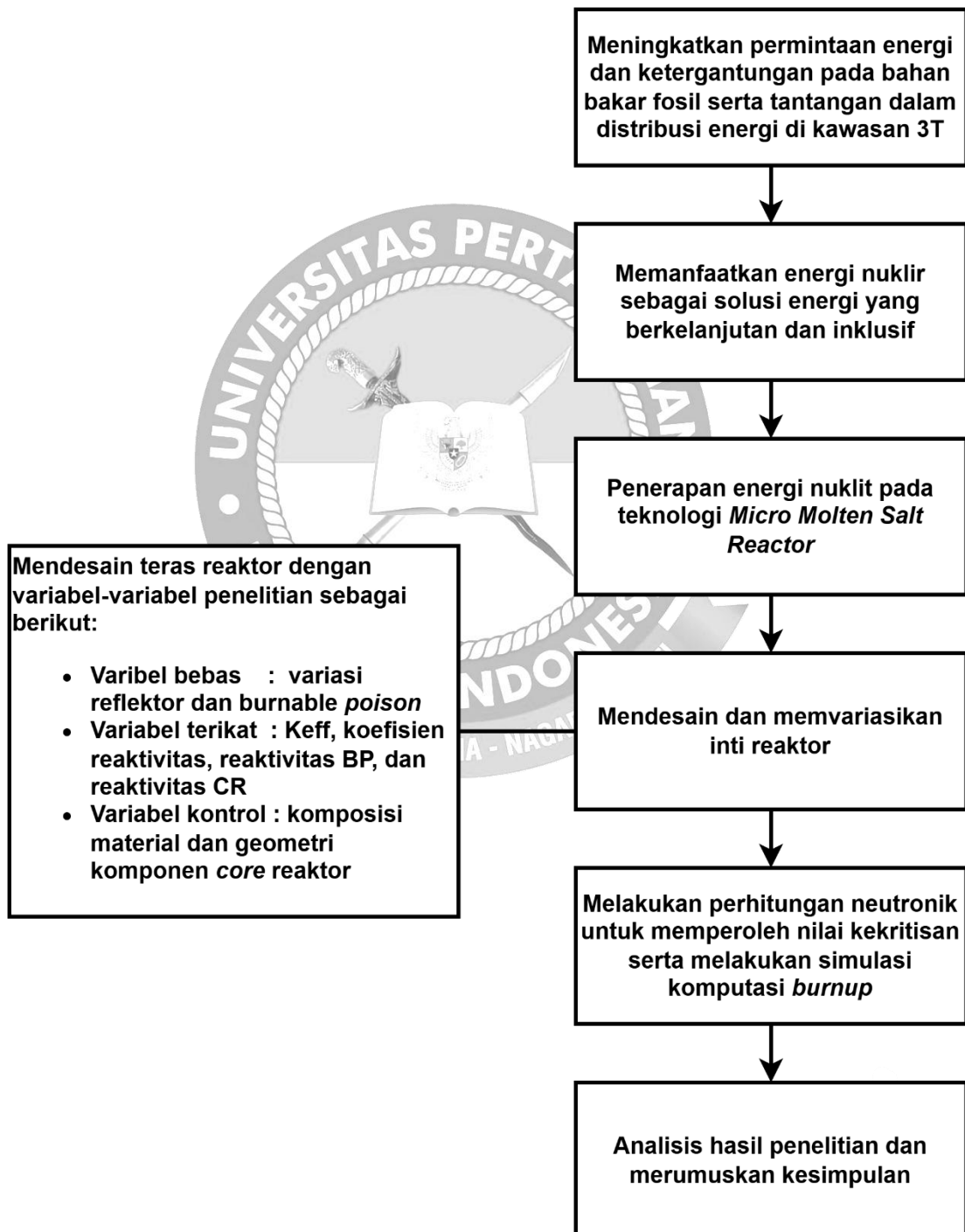
2	(Zhong et al., 2022)	<i>A feasibility study of SMART reactor power performance optimizations-part 2: Reflector material selection</i>	Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi Monte Carlo berbasis OpenMC	Material reflektor seperti BeO dan Be secara signifikan meningkatkan performa neutronik reaktor SMART, menjadikannya kandidat reflektor yang efisien.	Menggunakan metode simulasi Monte Carlo berbasis OpenMC dan menganalisis perubahan nilai faktor multiplikasi efektif akibat variasi material reflektor	Reaktor yang diteliti berbeda dan referensi tidak menganalisis <i>burnable poison</i> , serta parameter keselamatan seperti TCR dan VCR.
3	(Merk et al., 2021)	<i>Innovative investigation of reflector options for the control of a chloride-based molten salt zero-power reactor</i>	Menggunakan aplikasi SCALE code system dan KENO VI	Reflektor SS304, timbal, dan tembaga menunjukkan kinerja terbaik dalam kritikalitas dan distribusi daya	Penelitian ini menganalisis parameter neutronik reaktor <i>molten salt</i> dan melakukan variasi material reflektor	Aplikasi simulasi yang digunakan berbeda. Penelitian ini memakai OpenMC sementara studi referensi menggunakan SCALE dan KENO VI. Selain itu, penelitian ini

						berfokus reaktor micro- <i>molten salt</i> dan penggunaan <i>burnable poison</i> , yang tidak menjadi fokus dalam studi referensi yang meneliti reaktor daya nol.
4	(Dwijayanto et al., 2021)	<i>Model Comparison of Passive Compact-Molten Salt Reactor Neutronic Design Using MCNP6 and Serpent-2</i>	Studi ini menggunakan simulasi komputasi MCNP6 dan Serpent-2 dengan ENDF/B-VII.0 sebagai <i>neutron cross section library</i> dengan	Terdapat perbedaan hasil nilai K_{eff} dari SRAC2006 dengan metode yang digunakan MCNP6 dan Serpent-2. Didapatkan nilai TCR negatif, VCR positif, dan rasio	Penelitian ini sama-sama menganalisis perubahan reaktivitas (K_{eff}), TCR, dan VCR, serta reflektor yang digunakan sama menjadi referensi di penelitian ini.	Aplikasi simulasi yang digunakan berbeda. Penelitian memakai OpenMC sementara studi referensi menggunakan MCNP6 dan Serpent-2

			membandingkan hasil perhitungan sebelumnya yang telah dilakukan menggunakan kode deterministik SRAC2006	konversi kurang dari satu menunjukkan desain tersebut bukanlah reaktor pembiak.		
5	(Dodd et al., 2020)	<i>Novel homogeneous burnable poisons in pressurized water reactor ceramic fuel</i>	Penelitian ini menggunakan kombinasi simulasi komputasi MCNP dan ORIGEN	Penelitian ini menunjukkan setiap <i>burnable poison</i> memiliki keunggulan berbeda dalam pengurangan reaktivitas, risiko proliferasi, dan	Penelitian ini sama-sama menganalisis perubahan reaktivitas (K_{eff}) dan efek <i>burnable poison</i> terhadap performa reaktor.	Jenis reaktor dan parameter neutronik yang dianalisis berbeda.

				pengelolaan limbah.		
6	(Mghar & Chetaine, 2015)	<i>Effect of graphite reflector on the neutronic parameters of the TRIGA mark II research reactor</i>	Penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo dengan kode MCNP5	Penggunaan reflektor grafit mampu meningkatkan performa neutronik reaktor TRIGA melalui peningkatan faktor multiplikasi efektif serta penguatan fluks neutron termal di saluran iradiasi	Penelitian ini menganalisis parameter neutronik menggunakan grafit reflektor dan sama-sama memvariasikan ketebalan reflektor.	Reaktor yang diteliti berbeda dan tidak menganalisis <i>burnable poison</i> , serta parameter keselamatan seperti TCR dan VCR, dan Penelitian memakai OpenMC sementara studi referensi menggunakan MCNP5

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.8 Kerangka Berpikir

2.4 Hipotesis

- a. Tebal dan jenis material reflektor mengakibatkan kritikalitas dan *Micro Molten Salt Reactor* menjadi optimal.
- b. Variasi jenis material dan konsentrasi *Burnable Poison* mengakibatkan kritikalitas menjadi stabil, performa neutronik menjadi optimal, dan memenuhi kriteria keselamatan operasi pada *Micro Molten Salt Reactor*
- c. Konfigurasi reflektor dan *burnable poison* yang dioptimalkan menghasilkan reaktivitas batang kendali yang mencukupi, nilai TCR negative, dan VCR yang terkendali, sehingga *Micro Molten Salt Reactor* dapat beroperasi di Wilayah 3T Indonesia

