

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, batubara masih menjadi sumber energi utama di dunia khususnya di Indonesia, namun pemakaiannya menimbulkan emisi gas rumah kaca yang relatif besar serta ikut andil dalam kerusakan lingkungan dan perubahan iklim. Sebagai alternatif, reaktor nuklir berpotensi untuk menghasilkan energi tanpa menghasilkan kerusakan lingkungan dan emisi gas rumah kaca, sehingga tidak menambah dampak kerusakan lingkungan yang berkepanjangan. Keunggulan reaktor nuklir lainnya adalah dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar dan efisien dibandingkan pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara dan pembangkit listrik energi baru terbarukan lainnya.

Indonesia telah berkomitmen memanfaatkan teknologi nuklir secara damai dan bertanggung jawab. Telah dibuktikan dan tercermin dari keterlibatan aktif Indonesia dalam berbagai forum internasional di bidang nuklir. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral bersama International Energy Agency (IEA) meluncurkan rencana pemetaan Net Zero Emission (NZE) 2060 untuk sektor energi Indonesia (Siregar, 2024). Rencana ini menegaskan komitmen Indonesia dalam mitigasi perubahan iklim melalui pengembangan energi terbarukan, pengurangan bertahap PLTU batubara, pemanfaatan teknologi rendah emisi seperti *super grid* dan CCS/CCUS, peralihan ke kendaraan listrik, serta penggunaan energi baru seperti nuklir, hidrogen, dan amonia. Langkah nyata keterlibatan aktif Indonesia dalam berbagai forum internasional di bidang nuklir seperti International Energy Agency (IEA), Perjanjian Non-Proliferasi Nuklir (NPT), serta Perjanjian Pelarangan Uji Coba Senjata Nuklir (CTBT) (LEMHANNAS 2013 & ESDM 2013). Mulai 2035 energi terbarukan variabel akan mendominasi, sementara PLTN ditargetkan masuk sistem sekitar pada 2049.

Energi alternatif yang dapat dimanfaatkan dalam pembangkitan listrik salah satunya berasal dari reaksi inti atom, yang dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Sejak diperkenalkan pada awal 1950-an, teknologi

reaktor nuklir terus mengalami perkembangan signifikan, terutama dalam perannya sebagai sumber energi alternatif, yang ditandai dengan evolusi dari generasi I hingga mencapai generasi IV saat ini (Novalianda dkk., 2020). Dalam perkembangannya, reaktor nuklir dinilai memiliki tingkat risiko yang relatif rendah sehingga menarik perhatian global sebagai solusi energi jangka panjang (Shen dkk., 2024). Salah satu inovasi yang saat ini banyak dikembangkan adalah reaktor berukuran kecil yang dikenal sebagai *small modular reactor* (SMR). Jenis reaktor ini memiliki desain yang lebih fleksibel dan mampu menghasilkan daya listrik sekitar 300 megawatt elektrik (MWe), serta daya termal hingga 1.000 megawatt termal (MWth) (Al-Salhabi dkk., 2024). SMR dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi dalam skala yang lebih terbatas, sehingga sesuai untuk diterapkan di wilayah terpencil atau daerah dengan kondisi geografis yang sulit dijangkau (Cho & Lee, 2024). Selain itu, SMR menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan reaktor konvensional, di antaranya sistem keselamatan pasif, umur operasional yang panjang, serta tingkat ketahanan terhadap proliferasi yang lebih baik (Widiawati dkk., 2025).

Perkembangan reaktor nuklir dimulai dari generasi pertama hingga generasi keempat. *Small Pb-Bi Cooled No-Onsite Refuelling Nuclear Reactor* (SPINNOR) merupakan konsep reaktor daya kecil berpendingin timbal-bismut dengan spektrum neutron cepat yang mampu beroperasi lebih dari 15 tahun tanpa perlu pengisian ulang bahan bakar di lokasi. Konsep ini dikembangkan di Indonesia sejak awal 1990-an bekerja sama dengan Research Laboratory for Nuclear Reactors dari Tokyo Institute of Technology (Novalianda dkk., 2020).

Desain SPINNOR saat ini mencakup rentang daya antara 6 MWe hingga 100 MWe, dengan opsi bahan bakar berupa nitrida, Mixed Oxide (MOX), maupun bahan bakar logam. Pada penggunaan bahan bakar MOX, penambahan isotop Np-237 dalam jumlah tertentu dapat membantu menurunkan ayunan reaktivitas berlebih secara signifikan selama proses burnup. Teras reaktor dirancang agar memiliki ayunan reaktivitas *burnup* yang sangat kecil, kurang dari satu fraksi neutron terlambat efektif pada sepanjang masa operasinya, sehingga risiko

terjadinya kecelakaan kritis cepat (*prompt criticality accident*) dapat dihindari. Konsep dasarnya adalah bagian tengah teras reaktor diisi dengan material fertil. Selama operasi, material fertil ini akan berubah menjadi material fisil yang kemudian dapat mengimbangi hilangnya bahan fisil di bagian luar teras serta memberikan kontribusi terhadap efek reaktivitas negatif akibat kehilangan pendingin. Selain itu, diterapkan juga konsep fraksi volume bahan bakar yang tinggi di dalam teras untuk memungkinkan ukuran reaktor kritis yang lebih kecil (Widiawati dkk., 2025).

Metode yang umum digunakan dalam melakukan analisis neutronik adalah metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo adalah pemanfaatan angka acak yang dapat dimanfaatkan sebagai simulasi berbasis statistik (stokastik). Metode ini sangat efektif untuk proses-proses yang memiliki perilaku acak dan mengukur kriteria fisik yang hampir mustahil dihitung melalui pengukuran eksperimental (Putra dkk., 2022). Dalam bidang fisika nuklir, penerapan metode Monte Carlo dimanfaatkan untuk melakukan simulasi atau memodelkan suatu interaksi partikel dalam suatu sistem, seperti pada inti reaktor nuklir. Metode Monte Carlo dapat digunakan dalam analisis neutronik memiliki beberapa kelebihan dari pada metode deterministik, diantaranya tingkat akurasi yang tinggi untuk geometri kompleks, hasil yang mendekati kondisi sebenarnya (Graham dkk., 2017). Karena perhitungan dengan metode ini tidak memungkinkan dilakukan secara langsung melalui eksperimen, penyelesaiannya harus mengandalkan komputasi. Untuk mempermudah penggunaan metode ini, digunakanlah bantuan komputer dengan memanfaatkan perangkat lunak (*software*) atau *code* untuk melakukan perhitungan. Dari berbagai pilihan yang tersedia, salah satu yang paling banyak digunakan adalah Monte Carlo N-Particle (MCNP).

Metode komputasi yang sering digunakan menggunakan pendekatan statistik Monte Carlo untuk memberikan memodel pergerakan dan interaksi berbagai jenis partikel yaitu Monte Carlo N-Particle (MCNP). MCNP dapat memetakan dari gambaran nyata simulasi lintasan partikel seperti neutron, foton, elektron, termasuk interaksi gabungan antara neutron dan foton yang sering

muncul dari proses fisika di dalam material. Kemampuan analisis neutronik perangkat ini memiliki kelebihan yang lebih efisien dibandingkan perangkat lain mulai dari ketelitian kebolehjadian transpor partikel, sangat mudah dalam memaparkan bentuk geometri sama halnya dengan komposisi material, hingga ketersediaan basis data nuklir yang relatif lengkap. Program ini dikembangkan oleh Los Alamos National Laboratory (LANL) di Amerika Serikat dan banyak digunakan dalam studi-studi terkait reaktor nuklir maupun aplikasi radiasi (Widiawati dkk., 2025).

Perkembangan reaktor SPINNOR dimulai sejak 1990-an (IAEA, 2005) dan terus dikaji melalui simulasi Monte Carlo, dimulai oleh Arianto (2013) pada desain VSPINNOR, serta diperluas dengan bahan bakar torium oleh Uguru (2020), Novalianda (2024), dan Fabbyl (2025) untuk reaktor cepat. Keberhasilan uji kritis reaktor torium di China pada 2023–2025 juga menunjukkan potensi nyata siklus bahan bakar ini. Namun, penelitian terdahulu masih minim kajian parameter *conversion ratio* dan reaktivitas pada variasi fraksi bahan bakar ThN-UN di SPINNOR. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis neutronik reaktor SPINNOR berdaya 225 MWth berbahan bakar torium nitrida dan uranium nitrida menggunakan MCNP, untuk mengevaluasi burnup level, multiplikasi efektif, fluks neutron, serta CR selama 10 tahun operasi guna menentukan fraksi bahan bakar optimal.

Penelitian ini dilakukan berfokus pada analisis neutronik reaktor *Small Pb-Bi Cooled No-Onsite Refuelling Nuclear Reactor* (SPINNOR) dengan konfigurasi bahan bakar torium nitrida (ThN) dan uranium nitrida (UN) melalui simulasi menggunakan MCNP. Merujuk pada temuan penelitian terdahulu untuk model dari *small modular reactor* berbahan bakar torium (Uguru dkk., 2020), Studi Desain Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* Berbahan Bakar Thorium Nitride (Novalianda dkk, 2024), dan pemanfaatan bahan bakar torium dioksida untuk reaktor Pb-Bi *cooled* (Fabbyl. 2025).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi fraksi bahan bakar ThN–UN terhadap efisiensi desain teras reaktor SPINNOR pada daya 225 MWth, khususnya dalam hal tingkat *burnup* dan fluks neutron tertinggi, guna menentukan rentang fraksi optimal.
2. Mengkaji karakteristik kekritisan dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) reaktor SPINNOR berbahan bakar ThN–UN dengan variasi fraksi, serta mengevaluasi masa kritis dan nilai *excess reactivity* selama periode operasi hingga sepuluh tahun, untuk mengidentifikasi fraksi yang memberikan kestabilan reaktivitas terbaik.
3. Menentukan nilai *conversion ratio* (CR) awal dari desain reaktor SPINNOR pada daya 225 MWth, kemudian mengklasifikasikan jenis reaktor apakah termasuk *breeder*, *converter*, atau *burner* berdasarkan nilai CR yang diperoleh dari hasil simulasi.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Kajian ini memberikan gambaran mengenai bagaimana karakter neutronik bekerja di dalam reaktor cepat SPINNOR yang memakai torium nitrida (ThN) bersama uranium nitrida (UN) sebagai bahan bakarnya. Informasi tersebut dapat menjadi pijakan awal dalam merancang sistem reaktor cepat yang direncanakan dapat beroperasi lama tanpa perlu pengisian bahan bakar ulang.
2. Temuan dari penelitian ini juga dapat digunakan sebagai rujukan bagi peneliti maupun kalangan akademik yang sedang mengembangkan teknologi reaktor cepat. Secara khusus, hasilnya membantu memahami kinerja neutronik dan aspek keselamatan pada desain SPINNOR dengan konfigurasi bahan bakar berbasis ThN.