

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan lingkungan selalu menjadi isu hangat untuk diperbincangkan dan masih menjadi tantangan terbesar bagi kehidupan manusia pada abad ini. Terdapat banyak faktor yang menjadi alasan munculnya permasalahan lingkungan ini, salah satunya adalah meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂), metana, *hydrofluorocarbon* (HFC), dan *perfluorocarbon* (PFC). Di antara keempat macam gas tersebut, gas karbon dioksida lah yang paling besar memberikan kontribusi terhadap permasalahan lingkungan, khususnya pada permasalahan pemanasan global dan polusi udara. Lebih dari 75% komposisi gas rumah kaca di atmosfer adalah CO₂. Oleh karena itu, apabila konsentrasi CO₂ dapat diturunkan secara masif, maka permasalahan lingkungan seperti polusi udara dan pemanasan global dapat diatasi dan dampak yang ditimbulkan terhadap perubahan iklim pun dapat diminimalkan (Budi & Suparman, 2013).

Salah satu penyumbang emisi gas CO₂ terbesar adalah penggunaan batu bara untuk memenuhi kebutuhan listrik. Berdasarkan data *Energy Institute Statistical Review of World Energy* (2024) mengenai produksi listrik yang memanfaatkan batu bara sebagai bahan bakar selama sepuluh tahun terakhir, terlihat adanya penurunan penggunaan batu bara dalam pemenuhan kebutuhan listrik di dunia. Akan tetapi, kondisi tersebut berbanding terbalik dengan situasi di Indonesia, yang justru mengalami peningkatan sebesar 12,43% dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir. Jumlah emisi CO₂ di Indonesia pada tahun 2022 telah mencapai angka 737,07 ton. Sebagaimana diketahui, penggunaan bahan bakar fosil, khususnya batu bara untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), akan meningkatkan konsentrasi CO₂ di atmosfer yang berdampak pada polusi udara dan kenaikan suhu permukaan bumi. Polusi udara yang dihasilkan tidak hanya berdampak di daerah sekitar PLTU, tetapi juga terbawa oleh angin dan berpindah jauh hingga berpuluh-puluh kilometer jauhnya.

Untuk mengatasi permasalahan ini berbagai usaha harus dilakukan, salah satunya dengan beralih dari sumber energi berbahan bakar fosil ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Peralihan dari bahan bakar fosil ke energi baru terbarukan (EBT) memang memerlukan usaha substansial. Diperlukan adanya *global consensus* dalam mendukung transisi energi menuju *net zero emission* (NZE) untuk menangani perubahan iklim (Siregar, 2024). Selain itu, adanya kondisi geografis dan geologis yang berbeda-beda di setiap negara menjadi tantangan tersendiri dalam peralihan dan pemanfaatan energi yang lebih ramah lingkungan. Indonesia sendiri memiliki beragam potensi sumber energi untuk pengembangan energi terbarukan, mulai dari angin, panas bumi (geotermal), biomassa, surya, hingga air (Patra, 2022). Mengingat letak Indonesia yang berada di garis khatulistiwa, mengakibatkan Indonesia memiliki sederetan tantangan dalam pemanfaatan energi terbarukan. Sebagai contoh, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengalami penurunan efisiensi ketika memasuki musim penghujan, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dinilai kurang efektif dan optimal karena kecepatan angin di Indonesia relatif tidak merata dan lebih rendah dibandingkan dengan negara lainnya, serta Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang mengalami penurunan kapasitas produksi listrik ketika memasuki musim kemarau akibat pengurangan debit air.

Energi alternatif lain yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik adalah energi yang bersumber dari reaksi inti nuklir atau yang lebih dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Sejak awal tahun 1950-an, kemajuan teknologi reaktor nuklir terus berkembang, terutama sebagai sumber energi alternatif, yang dimulai dari generasi I hingga sekarang di generasi IV (Novalianda dkk., 2020). Reaktor nuklir sebagai sumber energi alternatif diketahui memiliki tingkat risiko yang rendah sehingga dunia sekarang semakin berfokus pada penggunaan energi nuklir (Shen dkk., 2024). Salah satu jenis reaktor yang kini tengah gencar-gencarnya dikembangkan adalah reaktor bertipe kecil yang biasa disebut dengan *small modular reactor* (SMR). SMR merupakan salah satu jenis reaktor nuklir kecil dengan desain yang unik dan mampu menghasilkan daya sekitar

300 megawatt elektrik (MWe) dan mampu menghasilkan daya termal hingga 1.000 megawatt termal (MWth) (Al-Salhabi dkk., 2024). SMR memang dirancang untuk menghasilkan daya pada skala kecil sehingga dapat diterapkan pada daerah yang sulit diakses dan lingkungan dengan lanskap yang menantang (Cho & Lee, 2024). SMR juga memiliki keunggulan dibandingkan dengan tipe reaktor lainnya, seperti sistem keamanan pasif yang memadai, siklus hidup yang panjang, serta tingkat resistansi terhadap proliferasi yang tinggi (Widiawati dkk., 2025).

Salah satu jenis SMR yang pernah didesain adalah *Small Pb-Bi Cooled No-Onsite Refuelling Nuclear Reactor* (SPINNOR) yang merupakan reaktor cepat berpendingin timbal-bismut (Pb-Bi), dengan kemampuan beroperasi lebih dari 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar. Reaktor ini memiliki beberapa keunggulan apabila diaplikasikan di Indonesia, salah satunya tingkat fleksibilitas dan skalabilitas yang tinggi. Hal ini karena pembangunan reaktor yang bertahap (*modular*) sehingga mempermudah dalam pengimplementasian di wilayah-wilayah kepulauan yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik utama. Selain itu, bahan bakar reaktor ini tidak memerlukan pengisian ulang hingga masa akhir pakainya. Reaktor ini juga dilengkapi dengan sistem keamanan pasif yang memungkinkan reaktor tetap aman tanpa adanya intervensi operator dalam kondisi darurat. Namun, untuk memastikan performa reaktor berjalan secara optimal, diperlukan metode analisis yang akurat dalam memprediksi perilaku-perilaku neutronik serta aspek-aspek keselamatan reaktor.

Metode yang umum digunakan dalam melakukan analisis neutronik adalah metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo merupakan kumpulan angka acak yang dapat diartikan sebagai simulasi berbasis statistik (stokastik). Metode ini sering digunakan untuk memodelkan proses-proses yang memiliki perilaku acak dan untuk mengukur kriteria-kriteria fisik yang hampir mustahil dihitung melalui pengukuran eksperimental (Putra dkk., 2022). Dalam penerapannya di bidang fisika nuklir, metode Monte Carlo dimanfaatkan untuk melakukan simulasi atau memodelkan suatu interaksi partikel dalam suatu sistem, seperti pada inti reaktor nuklir. Penggunaan metode Monte Carlo dalam analisis neutronik memiliki

beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode deterministik, diantaranya tingkat akurasi yang tinggi untuk geometri kompleks, penggambaran yang mendekati kondisi sebenarnya, serta dapat digunakan untuk berbagai kondisi operasional (Graham dkk., 2017). Namun demikian, karena metode ini hampir mustahil untuk dihitung dengan pengukuran eksperimental, maka diperlukan bantuan komputer untuk menyelesaikan suatu perhitungan. Untuk mempermudah penggunaan metode ini, digunakanlah bantuan komputer dengan memanfaatkan perangkat lunak (*software*) atau *.code* untuk melakukan perhitungan. Terdapat berbagai pilihan *software/code* yang dapat digunakan, salah satunya adalah Monte Carlo N-Particle (MCNP).

Monte Carlo N-Particle (MCNP) merupakan salah satu *code* berbasis metode Monte Carlo yang digunakan untuk mensimulasikan transpor partikel dan dikembangkan di Amerika Serikat oleh Los Alamos National Laboratory (LANL). MCNP dapat digunakan untuk mensimulasikan beberapa mode transpor partikel seperti neutron, foton, elektron, bahkan transpor kombinasi antara neutron dan foton yang diproduksi dari interaksi antar partikel. Dalam melakukan simulasi neutronik, MCNP memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan perangkat lunak (*software*) atau *code* lainnya, mulai dari simulasi transpor partikel yang akurat, fleksibilitas dalam geometri dan material, hingga basis data nuklir yang komprehensif (Widiawati dkk., 2025). MCNP juga menyediakan beberapa fitur, seperti menggambarkan perilaku neutron dalam sistem fisi, simulasi pelindung radiasi (*shielding*), serta pemanfaatan *phantom* pada studi dosis radioterapi (Antonio C. Lima dkk., 2024). Berdasarkan keunggulan-keunggulan tersebut, digunakanlah MCNP *code* untuk melakukan analisis neutronik pada reaktor SPINNOR berbahan bakar torium.

Penelitian ini akan melakukan analisis neutronik pada reaktor *Small Pb-Bi Cooled No-Onsite Refuelling Nuclear Reactor* (SPINNOR) berbahan bakar torium dioksida (ThO_2) menggunakan MCNP *code*. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Uguru dkk., 2020), telah dibuktikan bahwa penggunaan torium sebagai bahan bakar nuklir dapat meningkatkan efisiensi dan tingkat keamanan dalam

pengoperasian sebuah reaktor. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dihipotesiskan bahwa hasil serupa juga akan berlaku pada reaktor SPINNOR.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aspek neutronik pada sebuah reaktor cepat, yaitu *Small Pb-Bi Cooled No-Onsite Refuelling Nuclear Reactor* (SPINNOR) berbahan bakar torium dioksida (ThO_2) sebagai bahan fertil dan uranium nitrida (UN) sebagai bahan fisil, dengan variasi tingkat pengayaan uranium. Analisis dilakukan menggunakan metode Monte Carlo melalui MCNP *code*. Aspek-aspek neutronik yang akan dianalisis meliputi nilai kritikalitas, *burnup level*, nilai koefisien reaktivitas, serta perubahan densitas atom-atom penyusun bahan bakar. Simulasi *burnup* dijalankan selama sepuluh tahun dengan tiga daerah pembakaran (*region*). Dari penelitian ini diharapkan dapat diketahui performa neutronik reaktor, pengaruh variasi pengayaan dan fraksi bahan bakar terhadap parameter neutronik, serta kemampuan produksi Pu-239 dan U-233 pada reaktor SPINNOR berbahan bakar ThO_2 untuk mempertahankan pengoperasian reaktor selama beberapa tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Memberikan informasi terkait performa neutronik reaktor cepat SPINNOR berbahan bakar ThO_2 dan UN, sehingga dapat menjadi dasar dalam pengembangan desain reaktor cepat dengan sistem operasi tanpa pengisian ulang bahan bakar selama jangka waktu tertentu.
2. Sebagai referensi bagi akademisi maupun peneliti dalam mengembangkan teknologi reaktor cepat, terkhusus reaktor SPINNOR dengan bahan bakar ThO_2 , baik dalam performa neutronik maupun tingkat keselamatan reaktor.