

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam menghadapi tantangan global terkait kebutuhan energi berkelanjutan, *Small Modular Reactor* (SMR) muncul sebagai strategi alternatif dalam pengembangan teknologi nuklir masa depan. SMR adalah reaktor nuklir yang dirancang modular untuk memudahkan fabrikasi, transportasi, dan pemasangan (IAEA, 2022). Teknologi ini menawarkan keunggulan berupa sistem keselamatan pasif, waktu konstruksi yang lebih singkat, fleksibilitas lokasi, potensi efisiensi biaya dalam skenario pembangunan bertahap, serta aplikasi *multipurpose* seperti desalinasi, produksi hidrogen, dan *district heating* (Locatelli dkk., 2014; Mignacca dan Locatelli, 2020; Schlegel dan Bhowmik, 2023). Teknologi SMR seperti NuScale yang menggunakan desain *Pressurized Water Reactor* (PWR) dan sistem pendinginan pasif menjadi pilihan alternatif untuk dikembangkan lebih lanjut.

NuScale adalah salah satu desain PWR yang dikembangkan oleh Amerika Serikat di Universitas Oregon. Desain NuScale menjadi desain SMR pertama yang disetujui oleh *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) Amerika Serikat (NuScale Power LLC, 2023a). Reaktor ini terdiri dari beberapa modul untuk menghasilkan listrik, dimana satu modul NuScale sering dikenal dengan sebutan *NuScale Power Modul* (NPM). NPM memiliki desain yang lebih sederhana, lebih kecil, dan pembangkit listrik yang fleksibel. Sistem modularisasi memungkinkan komponen diproduksi dan dirakit di pabrik lalu diangkut dengan mudah sebagai satu unit ke lokasi untuk pemasangan dan pengoperasian (NuScale Power LLC, 2022) sehingga menjadi lebih efisien dalam hal waktu, biaya konstruksi dan berdampak positif secara ekonomis.

NuScale dapat dibangun dengan mengakomodasi variasi jumlah NPM. Daya luaran yang dihasilkan setiap NPM ini sebesar 77 MW(e). Konfigurasi standar NuScale meliputi 4-NPM pada 308 Mw(e), 6-NPM pada 462 MW(e), dan 12-NPM pada 924 MW(e). Teras NPM memiliki 37 *fuel assemblies* (FA) dan 17×17 batang bahan bakar yang terdapat pada setiap FA. Bahan bakar yang digunakan di

dalam teras reaktor NuScale memiliki pola penyusunan yang spesifik untuk setiap FA. Penyusunan ini dilakukan berdasarkan jumlah siklus operasi yang telah dilalui di teras, yaitu *twice burned fuel* (Batch A), *once burned fuel* (Batch B), dan *fresh fuel* (Batch C). Setiap *batch* ini juga dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan persentase pengayaan U-235 dan penggunaan campuran gadolinia pada bahan bakar (NuScale Power LLC, 2023b). FA dengan kode *batch* A-01, B-01, dan C-01 mengandung bahan bakar dengan campuran gadolinia, sedangkan A-02, B-02, C-02, dan C-03 tidak menggunakannya.

Salah satu aspek penting dalam pengoperasian reaktor nuklir adalah siklus operasi, yaitu lamanya reaktor dapat beroperasi sebelum memerlukan pengisian ulang bahan bakar. Semakin panjang siklus operasi, maka semakin tinggi efisiensi bahan bakar dan semakin rendah biaya operasional serta *downtime* reaktor. Pada awal pengembangannya, NuScale dirancang untuk menghasilkan daya listrik 50 MW(e) dengan siklus operasi selama 24 bulan (IAEA, 2018). Adanya pembaruan desain dengan daya luaran menjadi 77 MW(e) berdampak terhadap siklus operasi NuScale yang menjadi lebih pendek. Penyusunan bahan bakar yang terdiri dari tiga *batch* dilakukan pada siklus operasi 18 bulan (NuScale Power LLC, 2023b). Manajemen penggunaan bahan bakar di teras NPM diusulkan dalam desain reaktor ini guna meningkatkan efisiensi bahan bakar.

Strategi manajemen bahan bakar dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan pembakaran bahan bakar yang dapat memengaruhi siklus operasi. Pendekatan ini menjadi salah satu kunci penting untuk menjaga kinerja reaktor tetap stabil dan ekonomis sepanjang siklus operasi. Manajemen bahan bakar yang efektif memerlukan optimasi desain teras reaktor, yang berdampak langsung pada parameter neutronik, termal-hidrolik, dan keselamatan reaktor. Secara neutronik, optimasi desain akan berpengaruh terhadap kekritisitas teras, distribusi fluks neutron, reaktivitas, serta faktor daya puncak. Dalam tinjauan termal-hidrolik akan memengaruhi suhu bahan bakar, perpindahan panas, aliran pendingin, dan efisiensi sistem pendinginan. Sedangkan dari aspek keselamatan, optimasi desain harus menjaga margin keselamatan terhadap keadaan transien dan kecelakaan.

Penelitian Betancourt dkk. (2021) mengeksplorasi strategi penggunaan bahan bakar *Mixed Oxide* (MOX) di sepertiga teras reaktor *integral Pressurized Water Reactor* (iPWR). MOX adalah bahan bakar nuklir yang terbuat dari campuran nuklida fisil dan fertil yang biasanya digunakan untuk mendaur ulang limbah nuklir. Penelitian ini membandingkan berbagai komposisi bahan bakar yang mengandung plutonium dan uranium daur ulang, serta thorium sebagai material fertil untuk dianalisis parameter neutronik, termal-hidrolik, dan efisiensi siklus operasi reaktor. Perhitungan dan simulasi dilakukan menggunakan kode SERPENT dengan pustaka JEFF-3.1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan MOX dapat mencapai siklus operasi reaktor selama 48 bulan, mempertahankan distribusi daya yang lebih merata, serta menjaga koefisien reaktivitas suhu dalam batas aman.

Reaktor NuScale umumnya menggunakan bahan bakar oksida UO_2 yang diperkaya, seperti bahan bakar yang digunakan dalam reaktor PWR konvensional. Namun, penggunaan bahan bakar seperti $(U, Th)O_2$ dan $(Pu, Th)O_2$ dengan konsep *seed-blanket* pernah dilakukan pada reaktor NuScale oleh Gonçalves dkk. (2024). Perhitungan dan simulasi dilakukan menggunakan kode SERPENT dengan pustaka nuklir ENDF/B-VII. Konversi bahan bakar reaktor NuScale ke dalam model *seed-blanket* menghasilkan teras yang kritis, distribusi panas yang lebih merata, dan koefisien suhu moderator yang lebih negatif dari desain standar sehingga meningkatkan margin keselamatan termal-hidrolik. Pemanfaatan penggunaan plutonium dan thorium dapat mengurangi produksi limbah aktinida minor jangka panjang dan menawarkan manfaat tambahan dalam daur ulang plutonium dari limbah nuklir.

Pemanfaatan penggunaan siklus bahan bakar thorium pada reaktor iPWR dengan menggunakan desain teras NPM pernah dilakukan oleh Amatullah dkk. (2024). Penelitian ini membandingkan tiga jenis bahan bakar, yaitu $(U^{235} - U^{238})O_2$ untuk siklus bahan bakar uranium, $(U^{235} - Th^{232})O_2$ untuk siklus transisi uranium-thorium, dan $(U^{233} - Th^{232})O_2$ untuk siklus bahan bakar thorium penuh. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak SRAC 2006 dengan pustaka data nuklir JENDL-4.0. Siklus thorium menunjukkan keunggulan dengan nilai faktor multiplikasi awal sebesar 1,134 yang hampir setara dengan

uranium (1,129). Selain itu, siklus thorium memiliki fluks neutron dan *Conversion Ratio* (CR) yang lebih baik dalam rentang energi neutron termal, sehingga meningkatkan operasi keberlanjutan.

Penelitian ini menganalisis pengaruh berbagai variasi bahan bakar MOX tanpa gadolinia pada teras NPM untuk memperoleh siklus operasi reaktor yang lebih optimal. Perhitungan beberapa parameter neutronik akan ditinjau terhadap penggunaan monoThPu, monoUPu, multiUPu, multiThUPu, dan multiThU2 di *batch* A-01 NPM melalui metode simulasi komputasi berbasis OpenMC. Penelitian hanya menggunakan *burnable absorber* gadolinia di FA B-01 dan C-01 untuk mengontrol kekritisannya di teras reaktor. Strategi yang diusulkan dimulai dengan melakukan perhitungan untuk siklus operasi 21 bulan. Jika hasil perhitungan menunjukkan performa teras yang kritis, maka siklus operasi akan dinaikkan menjadi 24 bulan.

Pendekatan manajemen bahan bakar MOX dan perhitungan neutronik menggunakan OpenMC dalam penelitian ini merupakan studi yang belum pernah dilakukan dalam desain teras NuScale. OpenMC adalah kode simulasi transportasi neutron berbasis Monte Carlo. Simulasi ini menggunakan data nuklir *Evaluated Nuclear Data File* (ENDF). ENDF adalah salah satu perpustakaan data nuklir terkemuka yang menyediakan kumpulan data lengkap tentang interaksi neutron, proton, dan partikel lainnya dengan berbagai isotop. Optimasi desain reaktor ini akan menggunakan perpustakaan ENDF/B-VIII.0 (OpenMC, 2024).

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh komposisi bahan bakar jenis MOX yang lebih optimal pada reaktor NuScale. Beberapa parameter neutronik dianalisis terhadap variasi bahan bakar MOX dengan tujuan dapat memperpanjang siklus operasi reaktor, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan mengurangi jumlah bahan bakar bekas.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi reaktor nuklir berbasis SMR-PWR, khususnya pada desain teras NPM dalam aspek studi variasi jenis bahan bakar MOX. Konversi bahan bakar ini akan meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar yang dapat mempengaruhi siklus operasi reaktor. Simulasi yang dilakukan dalam penelitian digunakan sebagai gambaran awal kondisi teras reaktor sebelum dilakukan eksperimen fisik, yang dapat mengurangi resiko kegagalan dan menekan biaya.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup simulasi dan perhitungan pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut ini:

1. Penelitian difokuskan pada variasi jenis bahan bakar MOX yang digunakan dalam teras NPM, yaitu monoThPu, monoUPu, multiUPu, multiThUPu, dan multiThU2.
2. Perhitungan menggunakan kode simulasi berbasis Monte Carlo, yaitu OpenMC dengan pustaka data nuklir ENDF/B-VIII.0.
3. Parameter neutronik yang akan ditinjau sebagai dasar analisis hasil simulasi meliputi faktor multiplikasi neutron, nilai reaktivitas, distribusi fluks neutron dan faktor daya puncak.

1.5 Hipotesis

Manajemen penggunaan bahan bakar di dalam teras reaktor dengan variasi jenis bahan bakar MOX dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar. Nuklida fisil dengan fraksi yang tinggi seperti Pu-239 dan Pu-241 di dalam bahan bakar dapat mempertahankan reaksi fisi berantai berkelanjutan. Sedangkan, nuklida fertil di dalam bahan bakar MOX dapat meningkatkan konversi bahan bakar fisil. MOX yang dapat mempertahankan reaksi fisi berkelanjutan dan meningkatkan konversi bahan bakar fisil membuat siklus operasi reaktor menjadi lebih optimal.