

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Reaktor nuklir merupakan komponen utama Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang berfungsi mengendalikan reaksi fisi berantai (DOE, 2023). Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi global, desain reaktor nuklir dituntut memiliki efisiensi, nilai ekonomi, dan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan reaktor nuklir konvensional. Untuk menjawab kebutuhan tersebut, dikembangkan konsep *Small Modular Reactor* (SMR) yang berukuran lebih kecil dan bersifat modular (IAEA, 2023). Salah satu desain SMR yang baru-baru ini memperoleh lisensi adalah NuScale, yang termasuk jenis *integral Pressurized Water Reactor* (PWR) (NuScale Power, 2025a). Dalam operasinya, reaktor NuScale menggunakan racun neutron (*burnable poison*) dari material gadolinium yang terintegrasi dengan bahan bakar, guna menekan reaktivitas dan menurunkan puncak daya (NuScale Power, 2025b). Karena gadolinium menyerap neutron dan terdepleksi (menyusut) selama operasi, kemampuannya dalam menahan reaktivitas dan daya berubah seiring waktu. Oleh karena itu, perubahan komposisi gadolinium perlu dihitung melalui perhitungan deplesi bahan bakar guna memastikan reaktor tetap berada dalam batas keselamatan.

Deplesi bahan bakar merupakan prediksi perubahan jangka panjang terhadap komposisi (densitas) bahan bakar dan material yang ada di dalam reaktor akibat paparan fluks neutron selama reaktor beroperasi (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Fluks neutron diperoleh dengan menyelesaikan persamaan *transport* neutron menggunakan metode deterministik atau metode stokastik. Metode stokastik yang disebut juga metode Monte Carlo lebih banyak digunakan karena mampu merepresentasikan kondisi nyata dari interaksi neutron di dalam teras reaktor (Parker dan Woodcock, 1960). Dari fluks neutron, diperoleh parameter neutronik seperti reaktivitas, daya, faktor multiplikasi efektif (K_{eff}), dan laju reaksi nuklir sepanjang siklus (DOE, 1993).

Perhitungan deplesi memiliki tantangan komputasi yang berat karena memerlukan solusi *transport* neutron dan melibatkan perhitungan hingga ribuan nuklida. Semakin banyak nuklida yang terlibat, maka semakin lambat proses perhitungan komputasi. Selain itu, persamaan deplesi merupakan persamaan diferensial biasa yang bersifat kaku (*stiff*) karena adanya skala waktu yang sangat berbeda antar nuklida (Josey, 2017). Sebagian besar nuklida hasil reaksi fisi (produk fisi) bersifat tidak stabil, sehingga meluruh dengan waktu paruh yang bervariasi (IAEA, 2000). Beberapa produk fisi (seperti ^{135}Xe , ^{149}Sm) dan nuklida gadolinium berubah cepat karena memiliki penampang lintang serapan neutron termal yang besar, sedangkan bahan bakar utama berubah dengan perlahan (Evans dkk., 2022). Kondisi ini membuat perhitungan deplesi sensitif terhadap ukuran *time-step*, dimana *time-step* yang terlalu besar dapat menurunkan akurasi, sedangkan *time-step* sangat kecil memperbesar biaya komputasi. Oleh karena itu, pemilihan metode integrasi waktu yang memberikan keseimbangan antara akurasi, stabilitas numerik, dan efisiensi komputasi menjadi krusial (Josey, 2017).

Berbagai kode dan metode pengintegrasian telah dikembangkan untuk perhitungan deplesi. Kode deplesi berbasis Monte Carlo yang telah terbukti akurat (seperti MCNP6, Serpent, SCALE, VESTA) umumnya menerapkan metode integrasi dengan tahap prediksi dan koreksi (*Predictor-Corrector*) (Fensin dkk., 2012; Haack, 2012; Leppänen dkk., 2015; Rearden dan Jessee, 2018). Kode deplesi yang bersifat *open source* seperti OpenMC menawarkan metode integrasi waktu yang lebih beragam, yaitu *Predictor-Corrector* (*Predictor*, CE/CM, CE/LI, LE/QI, SI-CE/LI, SI-LE/QI), *Runge-Kutta* (EPC-RK4), dan *Commutator-Free Lie* (CF4) (Romano dkk., 2020). Di sisi lain, ONIX yaitu kode deplesi mandiri yang dipasangkan dengan *transport* neutron kode OpenMC, menerapkan skema integrasi *Beginning of Step* (BOS) dengan sistem *microstep* (de Troullioud de Lanversin dkk., 2021). Selain metode integrasi waktu, perhitungan deplesi juga melibatkan perhitungan eksponensial matriks, dimana kedua kode menggunakan metode *Chebyshev Rational Approximation Method* (CRAM) dengan orde yang berbeda. Studi sebelumnya (Calvin dkk., 2023) menunjukkan bahwa perbedaan stabilitas orde CRAM yang diterapkan oleh kedua kode relatif kecil, sehingga variasi hasil

depleksi lebih dipengaruhi oleh metode integrasi waktu. Pengujian terhadap hasil perhitungan depleksi dari kode OpenMC dan ONIX masih terbatas dan sejauh ini hanya dilaporkan oleh De Troullioud de Lanversin, dkk. (2021), Yu dan Forget (2022), dan Islam, dkk (2022). Padahal, pengujian semacam ini penting untuk memastikan bahwa perbedaan hasil yang muncul berasal dari karakteristik metode numerik, bukan akibat perbedaan pendekatan pemodelan sehingga interpretasi terhadap evolusi komposisi nuklida tetap valid.

De Troullioud de Lanversin, dkk. (2021) membandingkan hasil perhitungan densitas nuklida dari kode ONIX terhadap kode MCODE pada kasus *fuel rod* LWR (*Light Water Reactor*). Hasilnya menunjukkan bahwa selisih relatif dari perhitungan densitas nuklida berada di bawah 1%. Perbandingan antara kode ONIX dengan kode MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS dan MULTICELL pada kasus *fuel assembly* VVER-1000 menunjukkan adanya selisih yang kemungkinan disebabkan oleh perbedaan pustaka nuklir. Perbandingan antara kode ONIX dengan kode SCALE terhadap data eksperimen *fuel assembly* REBUS's GKN Unit II menunjukkan bahwa kesalahan relatif densitas kedua kode hampir sama. Namun, penelitian masih menggunakan geometri yang sederhana dan terdapat bias perhitungan akibat perbedaan pustaka nuklir. Penelitian ini juga tidak membahas pengaruh ukuran *time-step* yang digunakan untuk perhitungan depleksi.

Yu dan Forget (2022) membandingkan hasil perhitungan depleksi dari kode OpenMC dengan kode Serpent2 menggunakan kasus depleksi VERA pada *pincell* dan *fuel assembly*. Rentang perbedaan K_{eff} hanya berada pada interval -200 pcm (*percent mille*) hingga 200 pcm. Sedangkan selisih densitas nuklida hanya bervariasi dari 0,01%, 0,1%, dan 1%. Kemudian perbandingan antar delapan metode integrasi pada kode OpenMC menunjukkan bahwa metode SI-CE/LI unggul dalam segi akurasi. Namun, metode SI-CE/LI dan SI-LE/QI membutuhkan waktu komputasi hampir 20 kali lebih besar daripada *Predictor* serta penggunaan memori hingga 2,8 kalinya. Sementara metode lainnya kecuali *Predictor* terbukti sangat akurat, walaupun terdapat *tradeoff* yang memengaruhi akurasi dan memori. Validasi yang dilakukan pada penelitian ini masih menggunakan kasus dengan geometri yang sederhana.

Islam, dkk (2022) membandingkan perhitungan deplesi kode OpenMC, ONIX, dan DRAGON menggunakan kasus deplesi VERA pada *pincell* dan *fuel assembly*. Hasil perhitungan ketiga kode dibandingkan dengan hasil perhitungan kode McCARD. Selisih nilai K_{eff} dari hasil perhitungan kode OpenMC, ONIX, dan DRAGON terhadap hasil perhitungan kode McCARD adalah kecil dari 250 pcm. Perhitungan densitas nuklida dari beberapa isotop transuranik menunjukkan kesalahan relatif adalah sekitar 0,8%. Namun, penelitian ini tidak membahas pengaruh ukuran *time-step* yang digunakan untuk perhitungan deplesi dan metode integrasi yang digunakan pada kode OpenMC. Penelitian ini juga masih menggunakan kasus dengan geometri yang sederhana.

Keterbatasan penelitian sebelumnya menunjukkan perlunya pengujian lanjutan terhadap kinerja perhitungan deplesi dari kode OpenMC dan ONIX, khususnya pada sistem reaktor yang lebih kompleks. Penelitian ini membandingkan hasil perhitungan deplesi kedua kode pada teras reaktor NuScale yang mengandung gadolinium, untuk menilai keandalan serta batasan numerik masing-masing kode. Evaluasi dilakukan melalui komparasi nilai K_{eff} , densitas nuklida, waktu komputasi, dan penggunaan memori. Simulasi dilakukan selama satu siklus dengan skema *time-step* bertahap, yaitu 1 hari pada bulan pertama dan 30 hari pada bulan kedua hingga kedelapan belas, guna merepresentasikan dinamika nuklida berumur pendek dan panjang. Pendekatan *time-step* bertingkat ini juga diterapkan pada tiga penelitian sebelumnya. Untuk memastikan bahwa perbedaan hasil terutama dipengaruhi oleh metode numerik, kedua simulasi menggunakan pustaka data nuklir yang sama. Sejauh ini belum terdapat studi komparatif langsung antara OpenMC dan ONIX pada kasus teras reaktor NuScale, sehingga penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi orisinal dalam validasi kode deplesi *open-source* untuk sistem SMR berjenis PWR.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja kode OpenMC dan ONIX dalam melakukan perhitungan deplesi bahan bakar pada teras reaktor NuScale,

melalui evaluasi konsistensi hasil perhitungan kedua kode tersebut dalam aspek stabilitas parameter-parameter neutronik dan *burnup* serta efisiensi komputasi.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai justifikasi dalam pemilihan penggunaan kode OpenMC dan ONIX bagi peneliti yang melakukan perhitungan deplesi pada model teras reaktor NuScale maupun model SMR serupa. Selain itu, hasil perbandingan dalam penelitian ini dapat menjadi bahan evaluasi bagi pengembang kode OpenMC dan ONIX untuk meningkatkan kemampuan perhitungan deplesi dari kode mereka. Desain teras reaktor NuScale serta hasil perhitungan yang diperoleh juga dapat dimanfaatkan sebagai referensi bagi peneliti yang akan melakukan studi neutronik pada reaktor NuScale.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Sebagai penyederhanaan teknis simulasi, perhitungan deplesi hanya dilakukan untuk satu siklus operasi pertama dari teras reaktor NuScale selama 18 bulan. Pada kode OpenMC, metode integrasi waktu yang digunakan dibatasi pada metode yang telah dilaporkan memiliki akurasi yang baik dengan waktu komputasi yang relatif efisien (Yu dan Forget, 2022), yaitu CE/CM, CE/LI, LE/QI, EPC-RK4, CF4. Perbandingan densitas nuklida difokuskan pada nuklida yang dominan memengaruhi perilaku neutronik pada teras reaktor NuScale, yaitu nuklida bahan bakar (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu), nuklida produk fisi (^{135}Xe , ^{149}Sm), dan nuklida *burnable poison* (^{155}Gd , ^{157}Gd).

1.5 Hipotesis

Selisih dari hasil perhitungan deplesi antara kode OpenMC dan ONIX diperkirakan lebih besar pada perhitungan dengan *time-step* 30 hari, karena perbedaan akurasi dari metode integrasi waktu yang digunakan. Metode CF4 pada kode OpenMC diduga memiliki akurasi yang lebih tinggi karena melakukan empat kali perhitungan densitas nuklida dalam satu *time-step*. Sedangkan kode ONIX melakukannya sebanyak satu kali, sehingga diprediksi membutuhkan waktu komputasi dan penggunaan memori yang lebih kecil dibandingkan kode OpenMC.