

I. PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Energi nuklir sebagai salah satu opsi dalam upaya menekan ketergantungan terhadap energi listrik berbasis fosil dan mewujudkan energi bersih yang berkelanjutan telah mengalami perkembangan yang signifikan sejak unit pertama pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dibangun pada tahun 1954. Pada tahun 2020, setidaknya terdapat 408 unit yang sedang beroperasi dengan total kapasitas sebesar 362 GWe dan 52 unit lainnya yang sedang dalam tahap konstruksi.^[1] Hingga saat ini, perkembangan teknologi reaktor nuklir telah mencapai tahap riset dan pengembangan generasi IV yang fokus pada peningkatan aspek keselamatan dan keberlanjutan penggunaan bahan bakar.^[2]

Salah satu reaktor nuklir generasi IV dengan tingkat keberlanjutan bahan bakar yang tinggi adalah *Molten Salt Reactor* (MSR). MSR dapat beroperasi sebagai reaktor pembiak (*Molten Salt Breeder Reactor* dan *Liquid-metal Fast Breeder Reactor*), yaitu reaktor yang mampu menghasilkan bahan fisil pada siklus bahan bakarnya.^[3] Varian MSR dengan spektrum neutron cepat atau *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR) memiliki keunggulan tambahan berupa *safety draining system* yang meliputi tangki penampungan darurat dan katup beku di bagian bawah teras reaktor. Sistem keselamatan pasif MSFR memungkinkan bahan bakar yang berbentuk cair dievakuasi secara otomatis menuju tangki penampungan darurat ketika terjadi kenaikan temperatur berlebihan yang menyebabkan pelelehan katup beku serta memicu kecelakaan.^[4]

Brovchenko dkk (2013) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa temperatur maksimum yang dapat dicapai tanpa merusak material struktur teras adalah sebesar 1200°C jika diasumsikan temperatur rata-rata saat reaktor beroperasi secara normal adalah 700°C. Agar temperatur teras tidak melewati batas maksimum ketika terjadi kecelakaan, bahan bakar harus dievakuasi dari teras dalam waktu kurang dari 7 menit.^[5]

Desain teras, katup beku dan pipa alir yang digunakan harus disesuaikan agar waktu alir bahan bakar tidak melebihi waktu yang ditetapkan ketika terjadi kecelakaan.

Penelitian oleh Wang dkk (2016) menunjukkan bahwa dibutuhkan 95 detik bagi bahan bakar untuk keluar dari teras menuju tangki penampung dengan melewati satu pipa. Pada penelitian ini dilakukan variasi pada diameter dan panjang pipa serta titik leleh katup beku untuk menghitung waktu alir dengan menggunakan desain MSFR yang sudah disederhanakan dari desain reaktor pada proyek SAMOFAR oleh European Union.^[6] Sementara itu, Tano dkk (2018) yang menghitung waktu alir bahan bakar dengan desain MSFR dan perhitungan komputasi yang lebih detail menunjukkan bahwa dibutuhkan waktu selama 130 detik bagi bahan bakar untuk keluar dari teras MSFR melalui satu pipa. Pada penelitian ini, temperatur teras untuk setiap perubahan level ketinggian bahan bakar saat proses pengaliran juga dihitung. Namun, Tano dkk tidak menganalisa lebih lanjut mengenai perilaku neutronik di dalam teras.^[7]

Selama proses pengaliran bahan bakar berlangsung, reaktor akan dirancang untuk berhenti beroperasi namun reaksi fisi masih dapat terjadi dan panas masih tersisa pada bahan bakar akibat peluruhan produk fisi. Teras reaktor harus berada dalam kondisi subkritis hingga bahan bakar terevakuasi seluruhnya. Dengan asumsi bahwa material fisil terlarut dan terdistribusi dengan konsentrasi yang merata di dalam garam pendingin, aliran bahan bakar menuju tangki penampungan darurat akan mengalami fenomena yang berbeda dibandingkan dengan reaktor berbahan bakar padat yang pendinginnya tidak mengandung material fisil. Oleh karena itu, peninjauan terhadap kondisi kekritisian reaktor yang didefinisikan dengan nilai faktor multiplikasi efektif harus dilakukan.

Perhitungan faktor multiplikasi efektif dapat dilakukan menggunakan bermacam-macam metode, salah satunya adalah metode *Monte Carlo*, yang beberapa tahun belakangan mengalami perkembangan pesat akibat peningkatan kemampuan komputer untuk melakukan simulasi dan perhitungan dalam jumlah banyak dalam waktu bersamaan. *OpenMC* merupakan kode komputasi yang fokus pada perhitungan kriticalitas yang diaplikasikan untuk simulasi reaktor nuklir dengan metode *Monte*

Carlo. Adanya program *OpenMC* juga didasari oleh motivasi untuk membuat suatu kode yang mudah dikembangkan oleh khalayak ramai demi tercapainya performa yang maksimal dan kemudahan akses.^[8]

Dengan mempertimbangkan pentingnya peninjauan aspek neutronik melalui perhitungan kritikalitas teras dan perkembangan metode perhitungan untuk simulasi reaktor nuklir di masa sekarang ini, maka pada penelitian ini dilakukan perhitungan kritikalitas menggunakan *OpenMC* pada MSFR saat terjadinya proses pengaliran bahan bakar akibat kecelakaan yang disebabkan oleh kegagalan fungsi sistem pendingin reaktor^[9], yaitu sistem pendingin pada katup beku dan sistem penukar panas.

I.2 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kritikalitas teras menggunakan metode *Monte Carlo* dengan program *OpenMC* selama terjadinya proses pengaliran bahan bakar akibat kecelakaan pada MSFR yang disebabkan oleh kegagalan fungsi pendingin pada katup beku dan kegagalan pendingin pada sistem penukar panas.

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai salah satu acuan untuk mengembangkan desain MSFR dalam aspek keselamatan pasif reaktor.

I.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Desain reaktor yang digunakan adalah MSFR dengan spektrum neutron cepat berdaya termal 3000 MWth. Teras reaktor berbentuk silinder dengan tinggi dan jari-jari teras berturut-turut adalah 2,255 m dan 1,1275 m. Bahan bakar MSFR berupa 18 m³ LiF-ThF₄-UF₄ yang beroperasi dengan temperatur rata-rata 750⁰C. Skenario kecelakaan yang diterapkan adalah pelelehan katup beku akibat adanya kegagalan fungsi pompa pendingin pada sistem penukar panas dan kegagalan pendingin pada katup beku itu sendiri. Perbedaan simulasi pada kedua skenario terletak pada perbedaan temperatur bahan bakar. Temperatur bahan bakar pada kecelakaan akibat kegagalan fungsi pendingin pada sistem penukar panas adalah 1200 K sedangkan pada

kecelakaan akibat kegagalan fungsi pendingin pada katup beku tidak terjadi peningkatan temperatur rata-rata bahan bakar sehingga temperatur yang digunakan sekitar 900 K.^[9] Perhitungan kritikalitas teras selama proses pengaliran bahan bakar menggunakan *OpenMC* dengan pustaka data ENDF/B-8, sedangkan untuk validasi kode *OpenMC* menggunakan ENDF/B-7 karena disesuaikan dengan penelitian sebelumnya yang dijadikan sebagai pembanding. Simulasi untuk menghitung kritikalitas yang didefinisikan melalui faktor multiplikasi efektif tersebut mulai dijalankan ($t = 0$) setelah katup beku diasumsikan meleleh seluruhnya.

