

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan reaktor nuklir saat ini berada pada Generasi ke-IV yang dibangun berdasarkan perbaikan dan perkembangan reaktor generasi terdahulu. Faktor penting yang menjadi pertimbangan perkembangan pada reaktor generasi ini ialah aspek keselamatan, efisiensi dan ketersediaan bahan bakar dalam jangka waktu yang panjang, serta aspek proteksi fisik pada reaktor (Suwoto dan Zuhair, 2013). Salah satu jenis reaktor yang telah dipublikasikan pada generasi ini ialah *Molten Salt Reaktor* (MSR) dengan beberapa pengembangan teknologi seperti *Molten Salt Breeder Reaktor* (MSBR), *Molten Salt Reaktor Eksperimen* (MSRE), *Molten Salt Fast Reaktor* (MSFR), *Passive Compact Molten Salt Reaktor* (PCMSR), dan *Thorium Molten Salt Reaktor* (TMSR). MSR diklasifikasikan sebagai konsep reaktor nuklir generasi IV (Gen-IV) dengan keunggulan yang menguntungkan dibandingkan dengan reaktor konvensional *Light Water Reaktor* (LWR). Keuntungan utama MSR berkaitan dengan peningkatan pemanfaatan bahan bakar dan keselamatan reaktor. MSR beroperasi menggunakan garam cair (*fluorida*) sebagai bahan bakar sekaligus *coolant* dan grafit sebagai moderator (Forsberg, 2006).

Kekritisian reaktor merupakan kondisi yang harus dijaga dari reaktor nuklir. Penggunaan *control rod* memiliki kemampuan untuk menjaga serta mengatur tingkat kekritisian reaktor pada saat beroperasi dan *shutdown*. Tingkat kekritisian pada reaktor secara langsung mempengaruhi reaktivitas dalam teras reaktor. Peningkatan kekritisian dapat memicu kelebihan reaktivitas sehingga

memungkinkan terjadinya kecelakaan pada reaktor. Ashraf dkk (2021) melakukan analisis tingkat reaktivitas pada reaktor MSR tipe SD-TMSR (*Single-Fluid Double-Zone Thorium Molten Salt Reactor*) berdasarkan penggunaan densitas pada material desain *control rod* dengan sistem kendali CSD (*Control Safety Device*) dan SSD (*Shutdown Safety Device*). Simulasi dilakukan menggunakan kode Monte Carlo SERPENT-2 dan data pustaka nuklir ENDF/B-VII.0. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa penggunaan boron karbida (B_4C-90) sebagai batang kendali menunjukkan kinerja terbaik sebagai material penyerap neutron dalam mengontrol reaktivitas. Dwijayanto dkk (2024) melakukan perhitungan pengaruh densitas moderator grafit berdasarkan parameter neutronik dari reaktor *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR). Parameter neutronik berupa koefisien suhu reaktivitas, parameter kinetik, dan rasio konversi dievaluasi menggunakan komputasi MCNP 6.2. Dari hasil penghitungan, penurunan densitas grafit secara signifikan meningkatkan koefisien suhu reaktivitas dan juga menurunkan rasio konversi.

Reaktor dengan model TMSR-500 yang dipelopori oleh PT ThorCon, merupakan salah satu desain MSR yang telah dikembangkan oleh *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) (Chen, 2021). Saat ini, implementasi desain teknologi ThorCon TMSR-500 masih dalam tahapan konseptual dan memerlukan pengembangan lebih lanjut. Melalui Seminar Keselamatan Nuklir, Waluyo dan Khakim (2021) menyampaikan kajian terkait desain reaktor TMSR-500 oleh PT ThorCon Indonesia. Berdasarkan analisis neutronik, tingkat reaktivitas yang diperoleh pada teras reaktor terdapat kenaikan *void* sampai dengan 65% sehingga

menimbulkan reaktivitas positif sebesar $5\% \Delta k / k$. Berdasarkan hasil kajian yang dilakukan, disimpulkan bahwa studi desain pada reaktor TMSR-500 masih sangat umum dan belum detail, sehingga desain belum dapat ditetapkan.

Mikhaelia dkk (2021) telah membandingkan efektivitas Boron Karbida (B_4C), *Gadolinium Oxide* (Gd_2O_3), dan Hafnium (Hf) sebagai bahan yang digunakan pada *control rod Molten Salt Reactors* (MSRs) tipe ThorCon-MSR. Penelitian ini menunjukkan bahwa *gadolinium oxide* (Gd_2O_3) adalah bahan yang paling efektif sebagai *control rod*, dengan nilai *keff* terendah dan memenuhi persyaratan keselamatan untuk margin penghentian pada reaktor ThorCon-MSR. Selanjutnya, Khakim dkk (2022) melakukan evaluasi terhadap kemampuan sistem *shutdown* pada *control rod* dalam membatasi keadaan kritis pada reaktor TMSR-500 serta memastikan bahwa sistem tersebut efektif menjaga bahan bakar dalam keadaan subkritis. Penelitian menggunakan komputasi MCNP6 dengan data pustaka nuklir ENDF/B-VII.1. Hasil penelitian memaparkan bahwa kemampuan *control rod* yang digunakan tidak dapat mempertahankan keadaan subkritis pada *shutdown* pertama.

Berdasarkan penelitian terdahulu, skema pengendalian reaktivitas reaktor diatur berdasarkan penggunaan *control rod*. ThorCon-MSR memiliki skema *control rod* berupa *shutdown rod* dan *regulating rod* yang diletakkan dalam satu log dalam teras reaktor. Saat beroperasi, posisi *shutdown rod* digantikan dengan bahan bakar dan *regulating rod* sepenuhnya berada dalam reaktor. Sebaliknya, pada saat reaktor dipadamkan dengan *shutdown rod* seluruhnya berada dalam reaktor dan posisi *regulating rod* diisi dengan bahan bakar. Fokus pada penelitian ini dilakukan

untuk mencapai aspek keselamatan pada reaktor. Hal ini untuk mengurangi peluang terjadinya kecelakaan pada pembangkit listrik tenaga nuklir dan menjamin penggunaan jangka panjang reaktor nuklir. Perhitungan reaktivitas kerja reaktor sebagai nilai uji keselamatan reaktor disimulasikan melalui pemrograman dengan metode monte carlo.

Pada penelitian ini, simulasi perhitungan reaktivitas reaktor menggunakan komputasi *Open Source Monte Carlo (OpenMC)*. Simulasi OpenMC merupakan kode transport partikel Monte Carlo dengan *format file* input XML dan *output* HDF5 (Romano 2012; 2015). Penelitian yang dilakukan berupa analisis reaktivitas reaktor pada *Molten Salt Reaktor* tipe ThorCon dengan daya operasi 500 MWTh berdasarkan skenario penggunaan *control rod*. Analisis reaktivitas reaktor dengan skenario penggunaan *control rod* diharapkan mampu memberikan kontribusi untuk desain dan teknologi reaktor ThorCon di masa mendatang.

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh nilai reaktivitas reaktor ThorCon-MSR berdasarkan skenario *control rod*. Parameter nilai yang didapat adalah reaktivitas teras reaktor melalui pengaruh penggunaan *control rod* terhadap nilai k_{eff} yang diperoleh serta tinjauan neutronik berdasarkan persamaan *multigrup cross-section*.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi pada studi desain reaktor MSR tipe ThorCon dalam penggunaan *control rod* serta berkontribusi sebagai syarat uji keselamatan reaktor.

1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Model reaktor yang digunakan ialah MSR tipe ThorCon-TMSR-500 pada simulasi komputasi OpenMC dengan membuat *input* (*materials.xml*; *geometri.xml*; *settings.xml*, *tallies.xml*). Parameter reaktor yang digunakan adalah reaktor ThorCon MSR. Teras reaktor ThorCon disusun dengan konfigurasi saluran bahan bakar (*channel*) berbentuk *hexagonal* yang disebut Log. Konfigurasi pada teras terdapat 84 log bahan bakar garam cair NaF-BeF₂-UF₄-ThF₄ dan 1 log *control rod* yang terletak ditengah reaktor. Log bahan bakar terdapat NaF-BeF₂-UF₄-ThF₄ yang berfungsi *fuel salt* dan juga *coolant* serta moderator berbahan grafit. Skema *control rod* disimulasikan saat beroperasi berisi 3 *fuel salt* dan 1 berisi grafit sebagai *regulating rod*. Kemudian pada saat *shutdown*, log berisi 3 *Gadolinium Oxide* (Gd₂O₃) sebagai *shutdown rod* dan 1 *rod* berisi *fuel salt*. Neutron berasal dari U-235 dengan pengayaan 19,5%. Simulasi dilakukan dengan mengamati kondisi *normal operation* dan *shutdown* pada reaktor berdasarkan persentase penggunaan material bahan pada *control rod*. Kondisi *normal operation* disimulasikan berdasarkan lima skenario penggunaan *regulating rod*. Kelima skenario ini dilakukan dengan perbandingan sebagai berikut, 0% Gd₂O₃-100% grafit, 25% Gd₂O₃-75% grafit, 50% Gd₂O₃-50% grafit, 75% Gd₂O₃-25% grafit, dan 100% Gd₂O₃-0% grafit. Selanjutnya, pada kondisi *shutdown* dengan skenario penggunaan *regulating rod* 100% Gd₂O₃, 100% grafit, dan tanpa *regulating rod* (diisi bahan bakar). Simulasi pengaruh penggunaan *control rod* diamati untuk tingkat reaktivitas *swing* terendah pada saat *normal operation* yaitu berada di bawah 5% $\Delta k / k$ dan -0,5% $\Delta k / k$ pada saat *shutdown*.