

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

*Single Fluid Double Zone-Thorium Molten Salt Reactor* (SD-TMSR) merupakan reaktor pembiak termal dan memiliki bahan bakar berbasis thorium. SD-TMSR mengadaptasi konsep pengembangan reaktor garam cair yang dikhususkan untuk meningkatkan pembiakan bahan bakar dan pemanfaatan thorium untuk memproduksi energi seperti MSBR (*Molten Salt Breeder Reactor*) dan TMSR (*Thorium Molten Salt Reactor*) (Li dkk., 2018). Istilah *single-fluid* pada SD-TMSR menjelaskan bahwa baik bahan fisil maupun fertil terlarut pada garam yang sama, sedangkan *double-zone* merepresentasikan perbedaan zona teras berdasarkan ukuran jari-jari *fuel channel*. SD-TMSR didesain untuk dapat beroperasi selama 60 tahun jika dilakukan pemeliharaan yang baik (Ashraf dkk, 2019). Namun, karena grafit mengalami perubahan dimensi yang signifikan akibat iradiasi neutron, hal ini mengharuskan teras reaktor dirancang untuk penggantian dan perawatan berkala. Berdasarkan data eksperimen iradiasi MSRE (*Molten Salt Reactor Experiment*), masa pakai grafit pada moderator adalah 4 tahun sedangkan masa pakai grafit reflektor adalah 30 tahun (Rykhlevskii dkk, 2019).

SD-TMSR memiliki bahan bakar berupa garam cair yang pada umumnya terdiri dari komposisi eutektik berbasis pelarut FLiBe dengan *heavy metal* Th-232 dan U-233 (Ashraf dkk., 2019). Bahan fisil yang digunakan pada reaktor ini adalah U-233 dan tidak menggunakan U-235 seperti pada reaktor konvensional lainnya. Inventaris U-233 tidak didapatkan melalui pengayaan uranium alam melainkan diperoleh dari produk transmudasi Th-232. Ashraf dkk, pada tahun (2019) menggunakan desain SD-TMSR untuk melihat pengaruh dari laju pengumpanan Th-232 dan U-233 terhadap variasi nilai faktor multiplikasi neutron ( $k_{eff}$ ) dan *Breeding Ratio* (BR). Hasilnya didapatkan untuk mencapai keadaan kritis ( $k_{eff} = 1,00469 \pm 0,00035$ ) dengan nilai ( $BR = 1,11658 \pm 0,00060$ ) pada *steady state*, inventaris awal dari U-233 dan Th-232 disediakan dengan bobot sebesar 1,3ton dan 76,87ton sebagai *fresh fuel* di awal operasi.

Li dkk, pada tahun (2018) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh pembagian zona teras pada SD-TMSR terhadap BR dari Th-U. Hasil yang diperoleh menunjukkan ketika jari-jari *fuel channel* di zona *inner core* ditetapkan dan jari-jari di zona *outer core* diperbesar maka akan berdampak pada penyerapan U-233 dan *fission rate* yang hampir konstan di zona *inner core* dikarenakan kemampuan moderasi grafit tidak berubah. Sedangkan di zona *outer core*, penyerapan Th-232 akan semakin besar seiring bertambahnya ukuran jari-jari *fuel channel* dan juga berdampak pada nilai BR yang terus meningkat.

Pada umumnya LiF dan BeF<sub>2</sub> digunakan sebagai campuran garam cair bahan bakar, karena memiliki daya moderasi neutron dan penampang serapan neutron yang rendah. Namun, penggunaan Li-7 sebagai campuran eutektik bahan fertil dan fisil pada reaktor ini biasanya diperkaya hingga 99,995% untuk meminimalisir terbentuknya tritium (<sup>3</sup>H) setelah Li-6 menangkap neutron (Rykhlevskii dkk, 2019). Keberadaan Li-7 yang terlarut di dalam garam florida dibutuhkan dalam skala yang besar karena perannya sebagai campuran untuk menurunkan temperatur leleh dari *fuel salt* (Koger, 1972). Selain itu ketersediaan litium di alam sangat terbatas (Lumbanraja dan Liun, 2018).

TMSR-500 atau lebih dikenal dengan Thorcon MSR merupakan reaktor yang dirancang oleh Martingle Inc. Amerika Serikat. Reaktor ini memiliki bahan bakar berbasis NaBe yang terdiri dari (76NaF-12 BeF<sub>2</sub> -9,5 ThF<sub>4</sub> - 2,5(<sup>235</sup>U + <sup>238</sup>U)F<sub>4</sub>) mol% dengan U-235 diperkaya hingga 19,75% (Khakim dkk., 2022). Thoma dkk, pada tahun (1987) melakukan penelitian untuk menentukan kesetimbangan fase dari sistem NaF-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> dan memperoleh pemahaman tentang kristalisasi yang menyebabkan uranium dan thorium terpisah pada campuran yang mendingin melalui eksperimen pendinginan gradien termal. Hasil dari penelitian ini didapatkan *composition* I (78.5NaF - 6.5ThF<sub>4</sub> - 15UF<sub>4</sub>) mol%, *composition* II (75.5NaF - 10.5ThF<sub>4</sub> - 14UF<sub>4</sub>) mol%, *composition* III (64.5NaF - 27ThF<sub>4</sub> - 8.5UF<sub>4</sub>) mol%, dan *composition* IV (58.5NaF - 40ThF<sub>4</sub> - 1.5UF<sub>4</sub>) mol% yang merupakan komposisi eutektik. Kemungkinan rendahnya biaya bahan bakar dengan mengganti penggunaan <sup>7</sup>LiF dengan menambahkan NaF dapat membuat

bahan bakar berbasis NaF menarik untuk digunakan pada reaktor garam cair di masa depan (Thoma dkk., 1987). Namun, permasalahan terbesar adalah penggunaan U-233 sebagai *fresh fuel* di awal operasi reaktor. Biaya produksi bahan fisil U-233 sebesar \$46 juta/kg sedangkan inventaris ini dibutuhkan dalam jumlah yang besar dalam pengoperasian reaktor SD-TMSR. Harga ini terbilang sangat mahal jika dibandingkan dengan biaya pengayaan U-235 yang hanya \$100/kg (Mabruri dkk., 2022).

Mabruri dkk., pada tahun (2022) melakukan penelitian mengenai penggantian bahan fertil dan fisil pada *fuel salt* reaktor MSR FUJI-12. Reaktor ini merupakan salah satu reaktor garam cair yang dikembangkan oleh Jepang dengan ukuran teras terkecil jika dibandingkan dengan reaktor MSR sejenisnya. Dalam penelitian ini Mabruri dkk., (2022) mengganti *heavy metal* pada reaktor MSR FUJI-12 yang berbasis thorium dengan uranium alam dan mengkaji 3 komposisi eutektik dari LiF-BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub>. Setiap jenis komposisi di variasikan pengayaan bahan fisilnya (U-235) yang diambil pada rentang (3% - 8%). Seluruh perhitungan dan simulasi neutronik pada penelitian ini menggunakan OpenMC. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahan bakar yang mampu mencapai nilai  $k_{eff}$  yang optimal hanya ditemukan pada komposisi *fuel salt* 2 (69%-LiF, 23%-BeF<sub>2</sub>, 8%-UF<sub>4</sub>) dan *fuel salt* 3 (70%- LiF, 12%-BeF<sub>2</sub>, 18%-UF<sub>4</sub>) dengan pengayaan minimum U-235 masing-masing sebesar 8% dan 7%. Pada kedua komposisi ini juga ditemukan distribusi fluks neutron lebih stabil dari awal hingga akhir pengoperasian reaktor.

Berdasarkan kriteria keselamatan dan kepraktisan, pilihan terhadap campuran garam cair bahan bakar pada MSR sangat terbatas, pilihan didasarkan pada karakteristiknya yaitu tangkapan neutron, efisiensi moderasi, dan ketersediaannya (Lumbanraja dan Liun, 2018). Nuklida yang terlarut di dalam *fuel salt* harus berupa campuran eutektik, dimana gabungan dua atau lebih komponen padat yang tidak dapat bercampur satu sama lain dan berubah sempurna dari padat menjadi cair secara bersamaan pada suhu terendah yang disebut suhu eutektik (Zaini dkk., 2015). Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa campuran bahan bakar tetap dalam fase cair tanpa mengkristal dalam rentang suhu operasional reaktor.

Maka dari itu, untuk mendapatkan desain teras SD-TMSR dengan komposisi bahan bakar yang optimal dalam mencapai tingkat kekritisan maka perlu dilakukan penelitian terkait optimalisasi komposisi bahan bakar dengan mengganti penggunaan bahan fisil U-233 dengan U-235. Penggunaan campuran garam berbasis FLiBe akan diganti dengan NaF. Setiap komposisi eutektik dengan suhu dan densitas tertentu akan diuji dalam simulasi dan perhitungan untuk didapatkan parameter neutronik dari setiap variasi komposisinya, sehingga diperoleh komposisi bahan bakar yang optimal pada SD-TMSR. Seluruh perhitungan dan simulasi neutronik pada penelitian ini menggunakan OpenMC yang dapat mensimulasikan berbagai interaksi neutron dengan materi di dalam reaktor seperti emisi neutron, reaksi fisi, tangkapan radiatif, serta hamburan elastis dan inelastis.

## 1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk memperoleh desain teras SD-TMSR dengan komposisi *fuel salt* yang optimal dalam mencapai tingkat kekritisan selama pengoperasian reaktor. Adapun parameter neutronik yang akan dianalisis adalah hubungan faktor multiplikasi neutron ( $k_{eff}$ ) terhadap waktu, hubungan fluks neutron terhadap energi, distribusi fluks neutron pada penampang teras dalam arah radial, perubahan massa bahan fisil dan fertil terhadap waktu, perubahan *reaction rate* terhadap waktu, dan hubungan *Conversion Ratio* (CR) terhadap waktu.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai rujukan dalam pengembangan lebih lanjut terutama pada bahan bakar dari SD-TMSR, dan berkontribusi juga untuk pengembangan tipe MSR yang lain berbasis bahan bakar thorium.

## 1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam simulasi berbasis *Monte Carlo* dengan menggunakan OpenMC versi 0.14.0. Dimana dalam penelitian ini bahan bakar berbasis NaF disesuaikan dengan komposisi eutektik dengan *heavy metal*-nya adalah Th-232 dan (U-235 + U-238). Terdapat 3 variasi campuran garam cair yang

diambil sebagai sample uji di dalam penelitian ini dengan fraksi mol yaitu *fuel salt* I (78,5%-NaF, 6,5%-ThF<sub>4</sub>, 15%-UF<sub>4</sub>), *fuel salt* II (64,5%-NaF, 27%-ThF<sub>4</sub>, 8,5%-UF<sub>4</sub>), dan *fuel salt* III (58,5%-NaF, 40%-ThF<sub>4</sub>, 1,5%-UF<sub>4</sub>) (Thoma dkk., 1987). Reaktor dioperasikan selama 4 tahun, nilai  $k_{eff}$  yang harus dicapai pada saat awal pengoperasian reaktor adalah 1,013623 (Ashraf dkk, 2019). Variasi pengayaan U-235 sebagai bahan fisil digunakan pada rentang (5% - 20%) (Lumbanraja dan Liun, 2018; Mabruhi dkk, 2022). Pada penelitian ini tidak diterapkan *online refueling* yang dimana Pa-233 yang terbentuk tidak dipindahkan ke *pa-tank* dan tidak diberlakukan injeksi bahan bakar fertil maupun fisil selama reaktor beroperasi.

