

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi pada wilayah terpencil dan tuntutan terhadap sumber energi bersih, andal, dan berkelanjutan semakin mendesak di tengah isu perubahan iklim dan transisi menuju *net zero emission*. Sistem energi berbasis fosil masih mendominasi di banyak negara, namun ketergantungan ini menimbulkan emisi karbon yang signifikan. Meskipun energi terbarukan berkembang pesat, sifatnya yang *intermiten* (bergantung cuaca dan lokasi) menyebabkan pengadaan energi pada wilayah terpencil menjadi cukup sulit. Dalam konteks ini, reaktor nuklir mikro menjadi salah satu opsi yang strategis karena memiliki emisi karbon yang sangat rendah, bersifat kompak dan modular, serta mampu menyediakan pasokan daya berkelanjutan (Li dkk., 2024).

Selain reaktor skala besar, saat ini berkembang konsep reaktor nuklir mikro yang lebih ringkas, fleksibel, dan dapat dioperasikan di lokasi terpencil. Reaktor mikro berpendingin *heat pipe* (*Heat Pipe Reactor/HPR*) menjadi salah satu desain yang menjanjikan, karena menggunakan *heat pipe* logam cair sebagai media perpindahan panas secara pasif, tanpa pompa dan pipa sirkulasi besar. Keunggulan HPR antara lain keselamatan pasif, modularitas, kemudahan transportasi, serta potensi penggunaan di lokasi terpencil, pangkalan militer, lokasi bencana alam, maupun misi antariksa (Aldebie dkk., 2023; Guo dkk., 2023).

Keterbatasan utama HPR adalah ruang teras yang sangat terbatas akibat tuntutan desain kompak dan modular. Volume teras yang kecil menyebabkan densitas daya relatif tinggi dan gradien fluks neutron yang lebih tajam dibandingkan reaktor konvensional. Kondisi ini menuntut desain neutronik yang sangat stabil agar distribusi daya tetap seragam dan tidak menimbulkan konsentrasi daya lokal yang berlebihan. Ketidakseragaman distribusi daya dan terjadinya *hot-spot* lokal dapat meningkatkan risiko kegagalan sistem pembuangan panas (Huang dkk., 2026; Li dkk., 2024). Oleh karena itu, stabilitas distribusi daya menjadi parameter kunci dalam menjamin keselamatan operasi HPR. Parameter yang dapat digunakan untuk

mengendalikan reaktivitas sekaligus dapat mempengaruhi distribusi daya adalah konfigurasi batang kendali.

Batang kendali bekerja dengan menyerap neutron melalui material dengan *cross section* serapan tinggi seperti boron. Penyisipan batang kendali dan rotasi drum kendali dengan konfigurasi tertentu dapat mengatur jumlah neutron yang tersedia untuk mempertahankan atau menghentikan reaksi fisi. Variasi pada konfigurasi tersebut tidak hanya memengaruhi nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), tetapi juga menentukan worth batang kendali, yaitu kemampuan batang kendali dalam mengurangi reaktivitas. Efek ini sangat krusial dalam memastikan kemampuan *shutdown*, stabilitas daya, serta pencegahan kondisi tak terkendali (*reactivity excursion*) (Lamarsh dan Baratta, 2001). Studi terbaru menunjukkan bahwa desain HPR modern mengintegrasikan lebih dari satu mekanisme kendali yaitu batang kendali dan drum kendali untuk memastikan keselamatan serta fleksibilitas operasi (Aldebie dkk., 2023; Wang dkk., 2024).

Konfigurasi batang kendali juga berperan penting dalam pembentukan distribusi energi fisi dan distribusi daya di dalam teras reaktor. Penyisipan batang kendali yang tidak simetris atau terlalu terkonsentrasi pada area tertentu dapat menimbulkan distorsi fluks neutron, yang selanjutnya menyebabkan ketidakseragaman laju fisi dan peningkatan *burn-up* lokal. Kondisi ini berpotensi mempercepat degradasi bahan bakar dan meningkatkan risiko *hot-spot* termal, terutama pada desain HPR yang mengandalkan pendinginan pasif (Guo dkk., 2023; Wang dkk., 2024). Oleh karena itu, analisis konfigurasi batang kendali menjadi aspek penting dalam memastikan kinerja neutronik dan keselamatan termal reaktor.

Dalam rangka memahami fenomena tersebut, diperlukan suatu pendekatan berbasis simulasi komputasi. Monte Carlo N-Particle (MCNP) merupakan salah satu perangkat lunak yang andal dalam analisis neutronik, karena mampu menghitung interaksi neutron secara stokastik dengan tingkat akurasi tinggi. MCNP telah banyak digunakan untuk menghitung k_{eff} , distribusi fluks, spektrum energi neutron, serta nilai worth batang kendali pada berbagai rancangan HPR (Li dkk., 2024; Wang dkk., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh konfigurasi batang kendali terhadap aktivitas neutronik pada reaktor nuklir mikro berpendingin *heat pipe* menggunakan simulasi MCNP 6.2. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami sensitivitas desain HPR terhadap variasi konfigurasi kendali, sehingga mendukung pengembangan reaktor mikro yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi konfigurasi batang kendali terhadap kritisitas (k_{eff}) dan pengendalian reaktivitas HPR.
2. Menganalisis pengaruh konfigurasi batang kendali terhadap *burn-up* bahan bakar HPR.
3. Menganalisis perubahan distribusi fluks neutron dan daya pada teras reaktor sebagai akibat dari variasi konfigurasi batang kendali.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami pengaruh konfigurasi batang kendali terhadap karakteristik neutronik reaktor mikro berpendingin *heat pipe* serta dapat berkontribusi dalam perancangan sistem kendali reaktor mikro, khususnya terkait aspek kritikalitas, distribusi fluks, dan distribusi daya.