

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, pertumbuhan ekonomi nasional dan ekspansi sektor industri telah mendorong lonjakan permintaan listrik di Indonesia. Pada tahun 2024, data menunjukkan bahwa konsumsi listrik nasional meningkat sekitar 11% dibandingkan tahun sebelumnya. Konsumsi listrik per kapita tercatat sebesar 1.411 kWh dan diproyeksikan naik menjadi 1.439 kWh per kapita pada tahun 2025. Selain itu, total konsumsi listrik nasional diperkirakan mencapai 430 TWh pada tahun 2025 dan terus meningkat hingga 511 TWh pada tahun 2034 (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2024). Di sisi lain, batu bara masih menjadi sumber energi utama, menyumbang hampir 50% dari tambahan pembangkitan listrik nasional. Dominasi pembangkit berbasis bahan bakar fosil, khususnya batu bara dan gas, tetap tinggi dan mencakup sekitar 67% dari total permintaan listrik. Hal ini menyebabkan peningkatan emisi karbon sebesar 9% dengan intensitas mencapai 804 g CO₂/kWh (International Energy Agency, 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun upaya transisi energi telah berjalan, ketergantungan terhadap energi fosil masih sangat besar dan berpotensi menghambat pencapaian target dekarbonisasi nasional serta komitmen Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060.

Situasi ini menuntut adanya terobosan dalam pembangunan sumber daya energi nasional, terutama untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekan laju emisi karbon. Salah satu solusi strategis yang mulai diakselerasi pemerintah adalah pengembangan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) sebagai bagian dari upaya transisi menuju energi bersih dan pencapaian target Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060. Pemerintah telah menargetkan kontribusi

energi nuklir sekitar 7,9% dari total kapasitas pembangkit listrik nasional pada 2060, dengan rencana operasional PLTN pertama pada tahun 2032 (PT PLN (Persero) & Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2025). Solusi ini semakin relevan karena pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) menghasilkan listrik dengan tingkat emisi karbon yang sangat rendah. Reaktor nuklir hampir tidak menghasilkan emisi CO₂, terbukti selama proses pembangkitan hanya sekitar 3 ton CO₂ per GWh atau sekitar 3 g CO₂/kWh, bahkan pada semua reaktor konvensional rata-rata hanya berkisar 2 hingga 60 g CO₂/kWh, jauh lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik berbahan bakar fosil seperti batubara dan gas yang menghasilkan ratusan gram CO₂ per kWh (Liu dkk., 2023). Selain fungsi utama sebagai pembangkit listrik dengan emisi karbon sangat rendah, reaktor nuklir juga mampu menyediakan energi panas suhu tinggi untuk berbagai aplikasi industri (OECD Nuclear Energy Agency, 2022; Wu dkk., 2002). Fungsi kogenerasi ini memungkinkan reaktor menyediakan energi listrik sekaligus energi termal berkualitas tinggi yang dapat digunakan untuk proses industri seperti produksi hidrogen hijau, desalinasi air laut, dan pemanas industri berat (OECD Nuclear Energy Agency, 2022). Studi menunjukkan bahwa teknologi reaktor generasi IV, seperti *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR), sangat cocok untuk aplikasi multifungsi ini karena dapat menghasilkan suhu operasi tinggi sekitar 700 °C lebih dengan efisiensi termal yang tinggi dibandingkan reaktor konvensional lain pada umumnya (Wu dkk., 2002). Dengan karakteristik ini, HTGR tidak hanya efisien dalam pembangkitan listrik bebas emisi, tetapi juga sangat potensial untuk mendukung diversifikasi energi serta pengurangan emisi karbon di sektor industri melalui penyediaan panas proses dengan kadar energi tinggi yang dapat dipakai untuk berbagai aplikasi industri seperti produksi hidrogen hijau dan desalinasi air laut (OECD Nuclear Energy Agency, 2022).

Mendukung kebijakan transisi energi dan pemanfaatan reaktor nuklir sebagai solusi dekarbonisasi, maka pengembangan teknologi reaktor terbaru generasi ke-4 khususnya reaktor berbasis HTGR atau reaktor berpendingin gas

ini menjadi salah satu fokus riset nasional. Sebagai keberlanjutan hal tersebut Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) bersama dengan Institut Teknologi Bandung (ITB) tengah mengembangkan PeLUIt-40 (Pembangkit Listrik dan Uap Industri), reaktor suhu tinggi tipe *pebble-bed* dengan kapasitas 30 Mwt sebagai model integrasi riset dan aplikasi industri di Indonesia yang mengadaptasi model HTR-10 dari china (Trianti dkk., 2023a).

Pada reaktor tipe *pebble-bed* seperti PeLUIt-40, karakteristik neutronik dan termal sangat dipengaruhi oleh distribusi fluks neutron dan rapat daya pada arah aksial maupun radial di seluruh teras silinder. Salah satu studi menunjukkan karakteristik neutronik dengan skema pergantian bahan bakar yang berbeda untuk PeLUIt dengan batas geometri pada arah radial bagian *boronated carbon bricks* sebagai reflektor (Trianti dkk., 2023b). Namun studi tersebut belum mengkaji lebih lanjut tentang analisis neutronik di luar geometri pada teras reaktor tersebut dan tidak menggunakan *HTR-Code Package (HCP)*. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini diperluas kajian distribusi fluks neutron, rapat daya, dan kritikalitas reaktor hingga batas *Reactor Pressure Vessel (RPV)* guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif terhadap kinerja dan aspek keselamatan reaktor secara keseluruhan.

HCP merupakan paket kode terintegrasi yang dikembangkan di Forschungszentrum Jülich (FZJ) bersama RWTH Aachen University, yang dirancang khusus untuk mensimulasikan berbagai aspek relevan terkait desain dan analisis keselamatan reaktor HTGR secara menyeluruh dalam satu kerangka yang konsisten (Tantillo dkk., 2020). Perkembangan terkini HCP telah didokumentasikan oleh (Tantillo dkk., 2020), yang mencakup penambahan kode spektrum neutron TRISHA serta pembaruan modul neutronik MGT-N yang saling terintegrasi (Kasselman dkk., 2018), keduanya telah diverifikasi melalui benchmark HTR-10 dengan tingkat validitas yang sangat baik terhadap kode Monte Carlo Serpent (Tantillo dkk., 2020). Keunggulan HCP dalam mengintegrasikan perhitungan spektrum neutron, difusi neutron tiga dimensi,

burnup bahan bakar, serta manajemen bahan bakar pebble dapat dilakukan dalam satu platform menjadikannya alat simulasi yang memiliki kapabilitas tinggi untuk analisis neutronik reaktor HTGR bertipe *Pebble-bed*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, beberapa permasalahan utama yang dapat dirumuskan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik neutronik seperti faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), distribusi fluks neutron, dan distribusi daya pada reaktor PeLUIt-40 berdasarkan hasil simulasi menggunakan *HTR Code Package* (HCP)?
2. Bagaimana perbandingan skema pergantian bahan bakar antara *OnceTrough-Then Out* (OTTO) dan *Multipass* (MEDUL) pada reaktor PeLUIt-40 terhadap karakteristik neutronik?
3. Bagaimana karakteristik distribusi fluks neutron pada RPV yang dihitung dengan menggunakan *HTR Code Package* (HCP)?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya berfokus pada analisis neutronik reaktor PeLUIt-40 tipe *pebble-bed*, tidak membahas aspek termohidrolika
2. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *HTR Code Package*, yang mencakup perhitungan parameter neutronik dasar seperti faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), distribusi fluks neutron, dan distribusi daya pada reaktor.
3. Pustaka nuklir yang digunakan adalah ENDF/B-VII.0

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik neutronik reaktor seperti faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), distribusi fluks neutron, dan distribusi daya pada reaktor PeLUIt-40 berdasarkan hasil simulasi menggunakan HTR Code Package.
2. Mendapatkan perbandingan hasil pengaruh skema pergantian bahan bakar antara *Once Trough-Then-Out* (OTTO) dan *Multipass* (MEDUL) pada reaktor PeLUIt-40 terhadap karakteristik neutronik.
3. Menganalisis karakteristik distribusi fluks neutron pada RPV yang dihitung dengan menggunakan HCP.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman tentang karakteristik neutronik reaktor PeLUIt-40 melalui simulasi menggunakan HTR Code Package.
2. Mendukung pengembangan teknologi reaktor generasi IV di Indonesia melalui kajian baru pada analisis neutronik PeLUIt-40.
3. Menjadi referensi bagi peneliti lain yang ingin mengembangkan model reaktor PeLUIt-40

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terdiri dari lima bab utama yang diuraikan secara singkat sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan

masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan literatur yang mendasari penelitian.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang di dalamnya mencakup tempat dan waktu penelitian, alat dan perangkat lunak yang digunakan, serta prosedur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang hasil dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk ke depannya.

