

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Upaya mencapai Net Zero Emission (NZE) Merupakan respons global yang mendesak terhadap krisis perubahan iklim guna membatasi kenaikan suhu bumi dibawah 1,5°C melalui pengurangan drastis emisi gas rumah kaca. Dalam sistem ketenagalistrikan, dekarbonisasi menjadi pilar utama yang menuntut transisi dari bahan bakar fosil menuju sumber energi rendah karbon dan tanpa karbon (*zero-carbon generation*) demi menjamin keberlangsungan lingkungan bagi generasi mendatang (Nurhayati dkk., 2024). Salah satu terobosan fundamental dalam visi energi bersih ini adalah pengembangan energi fusi nuklir, yaitu proses penggabungan dua inti atom ringan yang melepaskan energi luar biasa untuk digunakan sebagai sumber panas pada stasiun pembangkit listrik masa depan. Melalui riset intensif pada perangkat pengurungan magnetik seperti tokamak dan stellarator, teknologi fusi diproyeksikan menjadi solusi energi tanpa emisi yang menyediakan pasokan listrik yang aman dan berkelanjutan (Rahmanta dkk, 2024; Sangaroon dkk., 2025).

Fusi nuklir dipandang sebagai teknologi energi masa depan yang menjanjikan karena ketersediaan bahan bakar yang melimpah dan profil keselamatan yang melekat pada proses termonuklirnya (Bolt dkk., 2004). Namun, pengembangannya menghadapi tantangan teknis yang signifikan akibat kondisi operasional ekstrem di dalam reaktor yang memberikan beban termal dan mekanis luar biasa pada komponen struktural (Pettinari dkk, 2025). Salah satu hambatan utama adalah iradiasi neutron intens berenergi tinggi yang menyebabkan degradasi material melalui perpindahan atom serta fenomena aktivasi nuklir, yakni material menjadi radioaktif dan memerlukan manajemen limbah yang kompleks. Oleh karena itu, evaluasi terhadap evaluasi neutron dan optimasi sistem perisai (*shielding*) menjadi sangat krusial dalam desain reaktor fusi seperti tokamak guna memastikan penggunaan material rendah aktivasi yang mampu menjaga keselamatan radiologis sekaligus meminimalkan dampak lingkungan jangka panjang (Pettinari dkk., 2025). Dengan studi melalui simulasi transpor partikel diperlukan untuk memahami

perilaku neutronik ini demi mewujudkan reaktor daya fusi yang layak secara ekonomi dan aman (Bolt dkk., 2004; Pettinari dkk., 2025)

Sebelum reaktor D-T komersial terwujud, fasilitas tokamak eksperimental yang saat ini beroperasi, termasuk ASDEX Upgrade, JET, dan KSTAR mayoritas menggunakan reaksi fusi *deuterium-deuterium* (D-D) yang menghasilkan neutron berenergi 2,45 MeV. Meskipun fluks dan energi neutron D-D lebih rendah dari D-T, studi aktivasi material pada kondisi ini tetap krusial karena memberikan data eksperimental dan komputasional yang menjadi fondasi validasi model untuk reaktor masa depan (Sauvan dkk, 2022; Bailey dkk, 2021). Neutron 2,45 MeV dari reaksi D-D mampu memicu berbagai reaksi aktivasi pada material struktural seperti $^{56}\text{Fe}(n,p)$, $^{58}\text{Ni}(n,p)$, $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)$, dan $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)$, yang menghasilkan isotop radioaktif dengan waktu paruh bervariasi dari beberapa jam hingga puluhan hari, sehingga berimplikasi langsung pada prosedur pemeliharaan dan keselamatan radiasi personel (Koleva dkk, 2021; Zammuto dkk, 2017). Pemilihan reaksi D-D dalam penelitian ini didasarkan pada dua pertimbangan: pertama, kondisi operasional ASDEX Upgrade memang menggunakan D-D sehingga model simulasi langsung merepresentasikan kondisi nyata fasilitas; kedua, reaksi D-D tidak memerlukan tritium sehingga secara operasional lebih aman dan relevan sebagai tahap validasi awal sebelum studi serupa dilakukan pada kondisi D-T (Sauvan dkk., 2022; Bailey dkk., 2021).

Aktivasi material merupakan fenomena ketika fluks neutron tinggi menginduksi pembentukan isotop radioaktif dalam material struktur reaktor. Studi di ASDEX Upgrade menunjukkan bahwa variasi konfigurasi material dan shielding dapat memengaruhi profil dosis radiasi dan umur komponen secara signifikan (Zammuto dkk., 2017; Zammuto dkk., 2021). Di sisi lain, desain shielding berfungsi untuk menahan transmisi radiasi neutron dan gamma ke luar teras reaktor. Optimasi shielding perlu mempertimbangkan ketebalan material serta keterbatasan ruang. (Humphry-Baker & Smith, 2019).

Dalam konteks penelitian, MCNP6 merupakan perangkat komputasi Monte Carlo yang andal untuk simulasi transport neutron, gamma, dan partikel lain pada

berbagai geometri reaktor. Versi MCNP 6.2 memiliki peningkatan signifikan, antara lain integrasi model emisi neutron dan gamma korelasi, perbaikan *library* data aktivasi, serta tally khusus untuk respons neutron dan foton (Werner dkk., 2018).

Meskipun studi aktivasi material pada fasilitas fusi internasional seperti JET, ITER, dan ASDEX Upgrade sudah banyak dilakukan (Juárez dkk., 2024; Martínez-Albertos dkk., 2023; Koleva dkk., 2021), penelitian serupa masih sangat terbatas di Indonesia. ASDEX Upgrade dipilih sebagai model acuan dalam penelitian ini karena geometri AUG03-nya telah terdokumentasi secara komprehensif, tersedia sebagai referensi tervalidasi untuk pemodelan MCNP6, dan vacuum chamber wall-nya berbahan baja tahan karat yang langsung relevan dengan tujuan penelitian ini (Stober dkk., 2015; Kallenbach dkk., 2019). Belum ada kajian mendalam tentang skenario aktivasi material dan desain shielding menggunakan MCNP6 dengan konfigurasi yang relevan untuk reaktor fusi. Inilah gap riset yang menjadi ruang kontribusi penelitian ini.

Secara lebih spesifik, belum banyak studi komputasional yang membandingkan pengaruh komposisi SS 304L dan SS 316L khususnya pengaruh penambahan molibdenum pada SS 316L terhadap distribusi fluks neutron, arus transmisi neutron pada permukaan vacuum chamber wall, dan laju reaksi aktivasi isotop kritis, menggunakan model geometri tokamak ASDEX Upgrade berbasis MCNP6. Selain itu, pengaruh variasi ketebalan vacuum chamber wall terhadap efektivitas shielding neutron pada kedua material tersebut juga belum dikaji secara komprehensif di Indonesia. Inilah gap riset spesifik yang menjadi ruang kontribusi penelitian ini.

Material baja tahan karat austenitik seperti SS 304L dan SS 316L merupakan kandidat utama dalam aplikasi struktur reaktor nuklir karena memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan korosi tinggi, serta stabilitas pada kondisi temperatur dan radiasi tinggi (Zinkle & Busby, 2021; Was, 2017). SS 304L memiliki komposisi yang lebih sederhana dengan kandungan nikel lebih rendah sehingga cenderung menghasilkan aktivasi neutron yang lebih kecil, sedangkan SS 316L mengandung molibdenum yang meningkatkan ketahanan korosi dan kekuatan material dalam kondisi ekstrem, namun berpotensi menghasilkan aktivasi neutron yang lebih tinggi

akibat kandungan unsur paduannya (Li dkk., 2022; Zinkle & Busby, 2009). Dibandingkan dengan material lain seperti tungsten atau baja ferritik/martensitik, kedua material ini memiliki keunggulan dalam kemudahan fabrikasi, ketersediaan industri, serta penggunaan luas sebagai material struktur, sehingga tetap relevan untuk dikaji dalam analisis aktivasi neutron dan optimasi shielding pada sistem reaktor fusi (Zinkle & Busby, 2021).

Penelitian ini dibatasi pada model geometri ASDEX Upgrade konfigurasi AUG03 dengan pendekatan satu oktan ($1/8$ geometri) digunakan karena model AUG03 memiliki simetri toroidal sehingga dapat mengurangi waktu komputasi tanpa mengubah karakteristik fisik distribusi neutron dan sumber neutron reaksi fusi deuterium-deuterium (D-D) berenergi 2,45 MeV. Material vacuum chamber wall yang dianalisis dibatasi pada baja tahan karat SS 304L dan SS 316L. Variasi ketebalan vacuum chamber wall dipilih pada nilai 2 cm, 4 cm, dan 8 cm. Ketebalan 2 cm mewakili kondisi di bawah referensi untuk melihat batas bawah performa shielding, 4 cm mendekati ketebalan asli model AUG03 ($\sim 3,6\text{--}4,0$ cm) sebagai pembanding yang relevan (Kallenbach dkk., 2019), sedangkan 8 cm mewakili dua kali lipat ketebalan referensi sebagai batas atas yang masih realistis secara rekayasa dengan mengacu pada desain vacuum vessel tokamak generasi lanjut seperti ITER yang menggunakan inner skin setebal 40–60 mm (Ioki dkk., 2012). Analisis dilakukan menggunakan MCNP6 dengan fokus pada distribusi fluks neutron, arus neutron, dan laju reaksi aktivasi melalui reaksi (n,p) dan (n, γ). Hasil yang diperoleh pada penelitian ini berupa laju reaksi aktivasi (*activation reaction rate*), yaitu jumlah reaksi aktivasi per satuan waktu akibat interaksi neutron dengan material. Perhitungan aktivitas radioaktif dalam satuan Becquerel (Bq) tidak dilakukan karena memerlukan informasi tambahan seperti waktu iradiasi, waktu pendinginan, dan konstanta peluruhan radionuklida.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perbedaan fluks neutron dan laju aktivasi pada SS 304L dan SS 316L.

2. Mengevaluasi pengaruh ketebalan terhadap efektivitas shielding neutron dan tingkat aktivasi material untuk memperoleh konfigurasi ketebalan yang optimal.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Menambah literatur dan pemahaman terkait analisis aktivasi material serta optimasi shielding dengan metode Monte Carlo (MCNP6), khususnya dalam konteks reaktor fusi
2. Memberikan rekomendasi teknis terkait pemilihan material dan desain shielding yang dapat diaplikasikan untuk meningkatkan keselamatan radiasi reaktor.
3. Mendukung upaya diversifikasi energi rendah karbon di Indonesia dengan menyediakan kajian ilmiah mengenai aspek keselamatan teknologi nuklir.
4. Menjadi dasar bagi penelitian lanjutan terkait material rendah aktivasi (*low activation materials*) dan pengelolaan limbah radioaktif dari fasilitas nuklir.