

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan yang terletak di antara tiga lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Zhu et al., 2024). Indonesia memiliki potensi besar untuk mengalami bencana gempa bumi dan tsunami. Bencana tsunami merupakan salah satu bencana alam yang sangat merusak dan dapat menyebabkan korban jiwa yang besar serta kerugian materi yang signifikan (Imamura et al., 2019). Beberapa peristiwa tsunami yang terjadi di Indonesia menjadi contoh nyata akan dampak dahsyat dari bencana ini, seperti yang terjadi pada Tsunami Aceh (2004), Tsunami Palu (2018), dan Tsunami Selat Sunda (2018) akibat letusan Gunung Anak Krakatau (Lahcene et al., 2021). Dalam perspektif pertahanan negara, tsunami dikategorikan sebagai ancaman nonmiliter, khususnya dalam dimensi keselamatan umum. Ancaman ini tidak melibatkan kekuatan bersenjata, melainkan mengancam keselamatan jiwa, ketertiban sosial, dan stabilitas wilayah secara langsung. Bencana tsunami dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur vital, menimbulkan ketidakstabilan ekonomi lokal maupun nasional, mengganggu jalannya pemerintahan, serta memperlemah kondisi sosial masyarakat terdampak. Penanganan ancaman ini memerlukan pendekatan strategis yang terintegrasi dalam sistem pertahanan dan ketahanan nasional, terutama dalam aspek mitigasi dan kesiapsiagaan bencana.

Kesiapsiagaan terhadap ancaman tsunami menjadi aspek krusial dalam konteks (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana, 2007). Hal ini mencakup pengembangan sistem peringatan dini yang andal, perencanaan evakuasi yang efektif, dan peningkatan kapasitas respons bencana oleh institusi pertahanan seperti TNI Simulasi dan pemodelan bencana berbasis

teknologi berperan dalam memperkirakan dampak tsunami dengan lebih akurat, memungkinkan perancangan upaya mitigasi dan strategi penempatan infrastruktur pertahanan yang lebih efektif. Sebagai bagian dari kekuatan pertahanan negara yaitu komponen pertahanan nirmiliter, peran lembaga-lembaga pemerintah terkait menjadi sangat vital dalam menghadapi ancaman tsunami (Peraturan Menteri Pertahanan Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2016 Tentang Pedoman Strategis Pertahanan Nir-Militer, 2016) tentang pedoman strategis pertahanan Nir-Militer. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) merupakan salah satu instansi kunci yang bertugas dalam mendeteksi, memantau, dan menginformasikan potensi ancaman tsunami kepada masyarakat dan pemerintah. BMKG berperan sebagai garda terdepan dalam sistem peringatan dini nasional, yang merupakan elemen penting dalam memperkuat kesiapsiagaan dan respons cepat terhadap bencana. Kerangka pertahanan negara menjelaskan bahwa BMKG berfungsi mendukung aspek ketahanan nasional melalui penyediaan data dan informasi strategis yang diperlukan untuk pengambilan keputusan, baik dalam konteks perlindungan warga negara maupun dalam upaya menjaga stabilitas wilayah terdampak. Integrasi antara kapabilitas teknis BMKG dengan kekuatan pertahanan negara, seperti TNI dan lembaga terkait lainnya, mencerminkan sinergi antara sektor nirmiliter dan militer dalam menjaga keselamatan umum sebagai bagian dari sistem pertahanan semesta.

Pentingnya integrasi antara pendekatan ilmiah dalam memahami dinamika tsunami dan strategi pertahanan yang terencana menjadi langkah krusial untuk melindungi Indonesia sebagai negara kepulauan sekaligus menjaga keamanan dan kedaulatan bangsa di tengah ancaman bencana alam. Tsunami yang terjadi di Indonesia pada tahun 2018 di daerah Anak Krakatau merupakan jenis tsunami yang disebabkan oleh longsoran. Salah satu sisi gunung berapi longsor dan menghasilkan gelombang setinggi 80 meter, menewaskan 437 orang dan melukai 14.059 orang (Paris et al.,

2020). Pengalaman dari berbagai kejadian tsunami menunjukkan pentingnya penanggulangan dan pemahaman mendalam terhadap fenomena ini guna meminimalkan dampak destruktif yang ditimbulkannya. Salah satu upaya untuk mengatasi risiko bencana tsunami adalah dengan melakukan pemodelan dan simulasi tsunami itu sendiri. Kompleksitas fenomena fisik yang terjadi selama bencana tsunami membuat pendekatan tidak mampu menghasilkan simulasi yang akurat. Salah satu metode matematika komputasi yang dapat menggambarkan fenomena fisik dengan tepat adalah Computational Fluid Dynamics (CFD) (Trimulyono, 2019).

CFD adalah cabang mekanika fluida yang fokus pada sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait lainnya melalui simulasi berbasis komputer. Salah satu metode CFD yang digunakan untuk menyimulasikan gelombang tsunami akibat longsor adalah pemodelan multi-fasa (Weber et al., 2019). Pemodelan ini melibatkan aliran beberapa fase termodinamika secara simultan, seperti campuran fluida, sedimen, dan udara, di mana interaksi antara berbagai fase serta antar partikel menjadi bagian integral dari hukum fisika yang mendasarinya (Sultan et al., 2019). simulasi ini terdapat fase sedimen dan fase air yang saling berinteraksi, di mana sedimen akan bertransportasi bersama air. Transportasi sedimen adalah proses di mana partikel-partikel padat, seperti pasir, kerikil, lumpur, atau batuan kecil, diangkut oleh aliran air. Jumlah sedimen yang diangkut bergantung pada kekuatan aliran air. Aliran yang lebih kuat dapat mempertahankan partikel dalam kolom air untuk diangkut ke hilir, sementara aliran yang lebih lemah menyebabkan partikel bergerak di sepanjang dasar saluran. Salah satu tantangan utama dalam pemodelan multi-fasa dengan CFD adalah waktu komputasi yang diperlukan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *solver Adaptive Mesh Refinement* (AMR) dapat mengurangi waktu komputasi secara signifikan.

AMR bekerja dengan meningkatkan kepadatan *mesh* hanya di area tertentu yang memenuhi kriteria spesifik, sehingga area yang tidak

menjadi fokus penelitian dapat diabaikan dari perbaikan tersebut (Zhang et al., 2019). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa AMR dapat memberikan tingkat akurasi yang sama dengan efisiensi yang lebih tinggi dalam memecahkan masalah pemodelan multi-fasa (Tofany, 2025). Ini menunjukkan bahwa *solver* AMR memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut dalam simulasi tsunami menggunakan CFD dan model multi-fasa. Simulasi tsunami menggunakan CFD telah dilakukan dalam penelitian sebelumnya, di mana eksperimen skala laboratorium digunakan sebagai data pembandingan untuk simulasi yang akan dilakukan. Simulasi gelombang tsunami menggunakan metode CFD dengan alat AMR dan model multi-fasa berhasil direplikasi pada skala laboratorium dengan pengaturan yang sama seperti eksperimen sebelumnya, dan hasilnya menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik (Rauter et al., 2022).

Kecepatan komputasi telah ditingkatkan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, namun waktu komputasi yang diperlukan untuk simulasi tersebut masih cukup lama. Penelitian ini berfokus pada peningkatan kualitas simulasi tsunami yang disebabkan oleh longsor dengan tujuan mempercepat waktu eksekusi tanpa mengurangi akurasi hasil. Peningkatan ini dicapai melalui optimalisasi parameter-parameter pada *solver* AMR. Fokus ini berangkat dari keinginan untuk membawa simulasi ke skala yang lebih besar dengan mengurangi beban komputasinya. Kontribusi itu akan dilakukan dengan mengoptimasi parameter AMR dengan metode *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II). Alasan dipilihnya optimasi parameter karena penelitian sebelumnya sudah menunjukkan bahwa AMR sendiri sudah berhasil mengurangi waktu komputasi dalam pemodelan multi-fasa namun kombinasi parameter terbaik dari AMR belum dioptimasi lebih lanjut.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana penerapan NSGA-II pada parameter AMR?
- b. Bagaimana cara mengoptimalkan waktu komputasi dan akurasi dari *solver* AMR?

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Menerapkan NSGA-II untuk menentukan parameter AMR
- b. Mempercepat waktu dan meningkatkan akurasi untuk pemodelan multifasa dengan konfigurasi *solver* AMR

1.4 Manfaat Penelitian

- a. Manfaat Teoritis
 - Landasan bagi kajian lebih lanjut untuk memaksimalkan potensi AMR untuk simulasi gelombang tsunami
 - Mempercepat waktu komputasi dan memperbaiki akurasi dari simulasi gelombang tsunami
- b. Manfaat Praktis
 - Landasan untuk pembuatan simulasi tsunami yang akurat dan praktis pada skala yang lebih besar sebagai partisipasi dalam penanggulangan ancaman Non-Militer berdimensi keselamatan umum