BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kaldera Toba merupakan salah satu struktur geologi terbesar dan paling kompleks di dunia, terbentuk akibat letusan supervulkanik raksasa sekitar 74.000 tahun yang lalu yang menghasilkan endapan Toba Tuff dengan volume mencapai lebih dari 2.800 km^3 (Chesner, 2012). Sisa dari aktivitas tersebut kini menjadi Danau Toba yang berukuran sekitar 100 × 30 km, dikelilingi oleh dinding kaldera yang terjal serta *resurgent dome* di Pulau Samosir. Aktivitas vulkanik masa lalu meninggalkan sistem bawah permukaan yang sangat heterogen, terdiri atas batuan beku, sedimen vulkanik, serta zona alterasi hidrotermal yang kompleks. Beberapa studi geofisika menunjukkan adanya anomali kecepatan gelombang seismik dan densitas di bawah kaldera yang mengindikasikan keberadaan zona lelehan parsial atau sisa dapur magma yang masih aktif secara termal (Koulakov et al., 2016; Anggraini et al., 2020; Handayani et al., 2025). Kompleksitas ini menjadikan Kaldera Toba sebagai laboratorium alam penting untuk memahami hubungan antara struktur vulkanik, aktivitas seismik, dan potensi bahaya geologi di wilayah Sumatra Utara.

Dari perspektif seismologi, wilayah Kaldera Toba menunjukkan karakteristik gelombang seismik yang tidak linear akibat propagasi gelombang melalui medium heterogen. Heterogenitas fisik seperti variasi kecepatan (Vp dan Vs), densitas, dan keberadaan rongga magma atau rekahan menyebabkan energi gelombang mengalami pembelokan (*refraction*), pemantulan (*reflection*), penyebaran (*scattering*), serta penguatan amplitudo lokal akibat *resonance*. Fenomena *resonance* dapat terjadi ketika frekuensi alami medium sebanding dengan frekuensi sumber, menghasilkan peningkatan amplitudo getaran lokal yang signifikan (Limberger et al., 2024). Sementara itu, fenomena *scattering* menggambarkan penyebaran energi gelombang akibat adanya ketidakteraturan struktural seperti batas antar-lapisan, sesar, atau kontras impedansi.

Kedua fenomena ini berperan penting dalam menentukan respons seismik lokal, yang menjadi dasar untuk memahami perilaku gelombang pada sistem vulkanik aktif maupun pasif seperti Toba.

Pemodelan gelombang seismik (*seismic wave modeling*) menjadi alat utama untuk mengkaji bagaimana gelombang merambat, berinteraksi, dan mengalami deformasi di dalam medium kompleks seperti kaldera. Melalui pemodelan, peneliti dapat mensimulasikan kondisi bawah permukaan secara terkendali tanpa harus bergantung sepenuhnya pada data observasi lapangan yang sering kali terbatas. Model numerik memungkinkan visualisasi fenomena fisik seperti *wavefield, resonant mode, dan energy scattering* yang sulit diamati secara langsung. Dalam konteks Kaldera Toba, pemodelan gelombang seismik memberikan peluang untuk mengevaluasi bagaimana heterogenitas struktur bawah permukaan memengaruhi propagasi gelombang dan menghasilkan pola *resonance* khas pada daerah *resurgent dome* maupun sekitar zona magma residu. Hal ini memiliki implikasi penting terhadap interpretasi sinyal seismik vulkanik, yang sering kali menunjukkan anomali amplitudo dan spektrum akibat pengaruh *resonance* lokal.

Salah satu pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam simulasi propagasi gelombang elastik adalah metode *Finite Difference* (FD). Metode ini bekerja dengan mengaproksimasi turunan parsial dalam persamaan gelombang menggunakan selisih hingga pada grid diskrit (Virieux, 1986; Nihei & Li, 2007). Keunggulan metode FD terletak pada kesederhanaan algoritma, efisiensi komputasi, serta kemampuannya untuk menggambarkan dinamika gelombang dalam domain waktu (*time-domain simulation*). Skema *staggered-grid Finite Difference* memungkinkan perhitungan stabil dan akurat untuk model 2D maupun 3D dengan kondisi batas kompleks (Qiao et al., 2024). Dibandingkan metode numerik lain seperti *Finite Element Method* (FEM) atau *Pseudo-Spectral Method*, pendekatan FD lebih mudah diimplementasikan dan efektif untuk studi propagasi gelombang di medium heterogen dengan skala besar seperti kaldera vulkanik. Penggunaan FD juga memungkinkan analisis *wavefield snapshot* dan *synthetic seismogram* secara simultan, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola *resonance* dan sebaran energi gelombang (*scattering zone*).

Meskipun sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memetakan struktur bawah permukaan Kaldera Toba melalui metode tomografi seismik (misalnya Koulakov et al., 2016; Nugraha et al., 2019; Anggraini et al., 2020), sebagian besar studi tersebut berfokus pada inversi kecepatan dan interpretasi geologi, bukan pada analisis dinamik interaksi gelombang di dalam kaldera. Kajian yang secara eksplisit mengaitkan *heterogeneity, resonance, dan scattering* melalui simulasi numerik berbasis *Finite Difference* masih terbatas. Sementara itu, penelitian global seperti Limberger et al. (2024) menunjukkan bahwa geometri dan komposisi kaldera dapat menghasilkan *resonance* seismik dengan frekuensi khas, sedangkan Qiao et al. (2024) membuktikan bahwa metode FD adaptif mampu meningkatkan akurasi perambatan gelombang dalam medium kompleks. Namun, hingga saat ini belum banyak penelitian yang menerapkan pendekatan serupa pada Kaldera Toba secara khusus untuk menganalisis hubungan antara *resonance* dan *scattering*. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengisi celah tersebut melalui pendekatan simulasi numerik yang terfokus pada karakter *resonance* dan penyebaran energi di lingkungan vulkanik Toba.

Urgensi penelitian ini juga didasarkan pada pentingnya nilai ilmiah dan terapan dari studi mengenai Kaldera Toba, terutama dalam konteks mitigasi potensi bahaya geologi di kawasan tersebut. Aktivitas seismik di wilayah ini masih terus teramati hingga saat ini, baik akibat gempa tektonik dari sistem patahan Sumatra maupun aktivitas vulkanik residu di bawah kaldera. Model gelombang seismik yang akurat dapat membantu memperkirakan respon getaran lokal, mengidentifikasi zona amplifikasi gelombang, serta mendeteksi area potensial yang mengalami *resonance trapping*. Hasil simulasi dapat menjadi dasar dalam interpretasi data seismik aktual, meningkatkan akurasi model tomografi, dan memberikan wawasan terhadap interaksi gelombang–struktur di zona vulkanik yang kompleks. Selain kontribusi akademik, penelitian ini juga memiliki nilai strategis dalam mendukung upaya mitigasi bencana di kawasan Danau Toba yang merupakan destinasi geopark nasional.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini berfokus pada pemodelan gelombang seismik 2D menggunakan metode *Finite Difference* untuk menganalisis fenomena *resonance* dan *scattering* di Kaldera Vulkanik Toba. Melalui pendekatan

ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh heterogenitas bawah permukaan terhadap dinamika perambatan gelombang, serta identifikasi zona *resonance* dan *scattering* di lingkungan kaldera.

Keterbatasan ketersediaan dan kelengkapan data seismik observasi resolusi tinggi di wilayah Kaldera Toba menjadi tantangan dalam kajian propagasi gelombang seismik secara langsung. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan pemodelan numerik untuk memahami fenomena fisik propagasi gelombang seismik di bawah Kaldera Toba, sehingga tidak bergantung pada kelengkapan data observasi lapangan.

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah bertujuan untuk menentukan isu utama yang mendasari penelitian, dengan menyoroti kesenjangan antara kondisi ideal dan temuan penelitian terdahulu pada kajian seismik Kaldera Vulkanik Toba. Melalui tahap ini ditetapkan fokus penelitian untuk memahami perilaku gelombang seismik, serta fenomena *resonance* dan *scattering* di bawah sistem kaldera. Adapun permasalahan yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kaldera Toba memiliki struktur bawah permukaan yang sangat *heterogen*, namun belum banyak kajian yang menghubungkan struktur tersebut dengan perilaku gelombang seismik, khususnya fenomena *resonance* dan *scattering*.
2. Penelitian sebelumnya di Toba lebih banyak menekankan pada pemetaan kecepatan dan densitas batuan melalui tomografi, sedangkan analisis dinamik interaksi gelombang dengan struktur internal kaldera masih terbatas.
3. Diperlukan pendekatan numerik yang mampu merepresentasikan propagasi gelombang secara akurat pada medium heterogen — dalam hal ini metode *Finite Difference* (FD) dinilai paling sesuai.
4. Belum tersedia model numerik 2D yang secara spesifik mengkaji respon *resonance* dan penyebaran energi gelombang seismik di Kaldera Vulkanik Toba, padahal pemahaman ini penting untuk analisis bahaya seismik dan vulkanik di masa mendatang.

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini bertujuan memperjelas batas kajian dan menjaga fokus penelitian agar sesuai dengan tujuan. Dengan mempertimbangkan keterbatasan data, kemampuan komputasi, serta relevansi terhadap fenomena *resonance* dan *scattering* gelombang seismik di Kaldera Toba, penelitian ini difokuskan pada pemodelan numerik propagasi gelombang elastik dua dimensi (2D) menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD). Ruang lingkup mencakup aspek metode, data, dan batas fisik dalam simulasi, sebagaimana dijelaskan berikut:

1. Penelitian difokuskan pada pemodelan gelombang elastik 2D di Kaldera Vulkanik Toba menggunakan metode (FDTD).
2. Model bawah permukaan disusun berdasarkan data sekunder berupa peta geologi PVMBG, parameter elastik Crust 1.0, dan informasi struktur kerak hasil tomografi seismik regional Toba, yang kemudian dipadukan untuk memperoleh konfigurasi stratigrafi dan parameter elastik di bawah Kaldera Toba.
3. Analisis difokuskan pada pengaruh heterogenitas kecepatan dan densitas terhadap perilaku *resonance* dan *scattering.*
4. Simulasi dilakukan dalam domain waktu (*time domain*), bukan frekuensi (*frequency domain*).
5. Penelitian tidak membahas aspek non-elastik seperti atenuasi viskoelastik, anisotropi, atau efek termal fluida magma secara eksplisit.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan agar kajian tetap terfokus dan sesuai dengan tujuan penelitian yang ingin dicapai. Batasan tersebut meliputi:

1. Penelitian hanya memfokuskan pada pemodelan gelombang elastik dua dimensi (2D) di Kaldera Vulkanik Toba menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) dengan asumsi medium elastik isotropik dan homogenitas lateral di luar arah simulasi.

2. Model bawah permukaan dibangun berdasarkan data sekunder, meliputi hasil tomografi seismik dan kajian geologi terdahulu, tanpa melibatkan pengukuran lapangan secara langsung.
3. Analisis difokuskan pada fenomena *resonance* dan *scattering* akibat heterogenitas kecepatan dan densitas batuan, tanpa mempertimbangkan efek non-elastik seperti viskoelastisitas, anisotropi, maupun pengaruh fluida magma.

1.5 Rumusan Masalah

Rumusan masalah disusun untuk memperjelas fokus penelitian serta menentukan arah kajian yang akan dilakukan. Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik propagasi gelombang seismik dua dimensi (2D) di Kaldera Vulkanik Toba yang memiliki struktur bawah permukaan heterogen?
2. Bagaimana fenomena *resonance* dan *scattering* gelombang seismik muncul akibat interaksi gelombang dengan variasi kecepatan dan densitas batuan di bawah Kaldera Toba?
3. Bagaimana metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) dapat diimplementasikan untuk mensimulasikan dan menganalisis respon seismik lokal serta potensi *resonance* di sistem vulkanik Toba?

1.6 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini disusun untuk memberikan arah yang jelas terhadap pelaksanaan kajian, khususnya dalam memahami dinamika propagasi gelombang seismik dan fenomena *resonance* di Kaldera Vulkanik Toba.

1. Untuk mengetahui karakteristik perambatan gelombang seismik dua dimensi (2D) di Kaldera Vulkanik Toba yang dipengaruhi oleh heterogenitas kecepatan (Vp, Vs) dan densitas batuan.

2. Untuk mengetahui mekanisme terjadinya fenomena *resonance* dan *scattering* akibat kontras impedansi serta variasi sifat elastik batuan di bawah Kaldera Vulkanik Toba.
3. Untuk mengetahui bagaimana penerapan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) dapat mensimulasikan propagasi gelombang elastik dan memberikan interpretasi terhadap respon seismik lokal serta potensi *resonance* pada sistem vulkanik Toba.

1.7 Manfaat Penelitian

1.7.1 Manfaat Akademik

1. Menambah pemahaman tentang interaksi gelombang seismik dengan struktur *heterogen* pada sistem kaldera vulkanik.
2. Memberikan referensi metodologis dalam penerapan metode *Finite Difference* untuk pemodelan gelombang seismik 2D.
3. Menjadi dasar bagi penelitian lanjutan, baik dalam pengembangan simulasi 3D maupun integrasi dengan metode *full-waveform inversion* (FWI) dan tomography.

1.7.2 Manfaat Praktis

1. Memberikan wawasan tentang potensi amplifikasi dan distribusi energi getaran di kawasan Kaldera Toba.
2. Mendukung pengembangan sistem mitigasi bahaya gempa dan aktivitas vulkanik melalui pemodelan respon seismik lokal.
3. Menjadi acuan bagi instansi geofisika, vulkanologi, dan kebencanaan (seperti PVMBG atau BMKG) dalam memahami dinamika bawah permukaan Toba.