

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Eksplorasi dan karakterisasi bawah permukaan bumi merupakan salah satu aspek penting dalam bidang geofisika, terutama untuk mengidentifikasi struktur geologi, sumber daya alam, serta memahami dinamika bumi. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah analisis penjalaran gelombang seismik karena gelombang tersebut membawa informasi mengenai sifat fisik medium yang dilaluinya. Pemodelan gelombang seismik satu dimensi (1-D) sering dijadikan langkah awal untuk mempelajari interaksi gelombang dengan lapisan bawah permukaan sebelum diterapkan pada model yang lebih kompleks. Oleh karena itu, keakuratan simulasi gelombang menjadi faktor penting karena berpengaruh langsung terhadap kualitas interpretasi dan proses inversi parameter medium Apostol (2023); Chen & Huang (2025).

Simulasi gelombang seismik umumnya dilakukan menggunakan metode numerik klasik, seperti *finite-difference*, *velocity-stress formulation*, maupun *distributional finite-difference*. Berbagai metode tersebut telah terbukti mampu memodelkan propagasi gelombang pada medium homogen maupun heterogen dengan baik Masson (2022); Masson & Virieux (2023); Masson et al. (2024). Selain itu, penerapan kondisi batas yang tepat juga berperan penting dalam menjaga stabilitas simulasi dan mengurangi refleksi numerik yang tidak diinginkan Wang et al. (2022); Gao (2022); Mu & Alkhalifah (2024). Namun, kebutuhan komputasi terus meningkat seiring bertambahnya ukuran model, resolusi simulasi, serta proses inversi yang dilakukan secara berulang.

Salah satu pendekatan untuk memperoleh parameter bawah permukaan adalah inversi seismik, yaitu proses memperbarui model secara iteratif agar data sintesis

semakin mendekati data observasi. Keberhasilan proses inversi sangat dipengaruhi oleh formulasi fungsi objektif yang digunakan. Meskipun fungsi *least-squares* masih menjadi pilihan yang umum, metode ini sering mengalami permasalahan *cycle skipping*, yaitu kesalahan pencocokan fase gelombang akibat pergeseran waktu tempuh yang melebihi setengah periode gelombang, serta non-konveksitas fungsi objektif yang menyebabkan proses optimisasi rentan terjebak pada minimum lokal alih-alih mencapai solusi global. Oleh karena itu, berbagai pendekatan alternatif seperti *weighted envelope correlation* dan *Physics-Informed Neural Networks* (PINN) telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas hasil inversi Song et al. (2023); Zhang et al. (2023); Neumann & Yang (2025).

Di sisi lain, perkembangan komputasi kuantum membuka peluang baru dalam simulasi ilmiah yang memiliki kompleksitas tinggi. Melalui pendekatan *Schrödingerisation*, persamaan diferensial parsial dapat dipetakan ke bentuk evolusi kuantum sehingga memungkinkan penyelesaiannya menggunakan algoritma kuantum Jin et al. (2024); Hu et al. (2024). Pendekatan ini kemudian dikembangkan untuk persamaan gelombang elastik sehingga hubungan antara parameter medium dan Hamiltonian kuantum dapat dibangun secara lebih langsung Jin & Zhang (2025). Meskipun perangkat keras kuantum masih menghadapi tantangan berupa *noise* dan keterbatasan jumlah qubit, perkembangan teknologi dan algoritma kuantum terus menunjukkan kemajuan yang signifikan Peng et al. (2023); Cai et al. (2023); Gong et al. (2025).

Penerapan konsep tersebut pada bidang geofisika ditunjukkan oleh Schade et al. Schade et al. (2024) yang mengembangkan simulasi gelombang elastik satu dimensi berbasis komputasi kuantum. Penelitian tersebut kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Bösch et al. Bösch et al. (2025) dengan menambahkan *wave source*, *boundary condition*, serta evaluasi fungsi objektif sehingga simulasi tidak hanya digunakan untuk *forward modelling*, tetapi mulai mengarah pada pembentukan kerangka inversi.

Meskipun demikian, penelitian yang ada masih didominasi oleh simulasi for-

ward dan pengembangan formulasi matematis. Integrasi antara simulasi gelombang elastik kuantum, *source*, fungsi objektif, dan proses inversi dalam satu *pipeline* yang utuh masih sangat terbatas. Penelitian berbasis quantum annealing juga telah menunjukkan potensi dalam optimasi inversi seismik, tetapi belum mengintegrasikan simulasi gelombang elastik kuantum sebagai model forward utama Vashisth et al. (2025). Kondisi tersebut menunjukkan masih adanya peluang untuk mengembangkan kerangka inversi seismik berbasis komputasi kuantum yang lebih terintegrasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan dan studi *Inversi Seismik Gelombang Elastik 1-D Berbasis Simulasi Sirkuit Kuantum*. Penelitian difokuskan pada integrasi pemodelan gelombang elastik satu dimensi berbasis simulasi sirkuit kuantum dengan *seismic source* dan formulasi fungsi objektif untuk proses inversi. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman mengenai integrasi konsep Schrödingerisation, simulasi sirkuit kuantum, *seismic source*, dan evaluasi misfit dalam satu kerangka inversi yang terintegrasi, sekaligus menjadi langkah awal bagi pengembangan metode inversi seismik berbasis komputasi kuantum di masa mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana membangun model simulasi kuantum untuk persamaan gelombang elastik satu dimensi yang mengakomodasi *source* dan evolusi gelombang dalam kerangka *Schrödingerisation*?
2. Bagaimana hasil simulasi kuantum dibandingkan dengan solusi numerik klasik dalam merepresentasikan propagasi gelombang elastik satu dimensi?
3. Bagaimana fungsi objektif dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat ke-

sesuaian antara hasil simulasi kuantum dan data target sebagai dasar pengembangan inversi seismik satu dimensi?

4. Apa saja potensi dan keterbatasan pendekatan simulasi kuantum terhadap permasalahan inversi seismik satu dimensi ditinjau dari akurasi, *noise*, dan kebutuhan sumber daya komputasi?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan ketercapaian penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut.

1. Penelitian dibatasi pada pemodelan dan simulasi gelombang elastik satu dimensi (1-D).
2. Medium bawah permukaan dimodelkan sebagai medium elastik berlapis sederhana yang terdiri atas dua lapisan, dengan densitas (ρ) ditetapkan konstan (*fixed*) dan hanya modulus geser (μ) yang dijadikan parameter yang diinversi.
3. Model gelombang yang digunakan mengacu pada persamaan gelombang elastik linier satu dimensi sebagaimana diformulasikan dalam penelitian.
4. Persamaan gelombang ditransformasikan menggunakan pendekatan *Schrödingerisation* dan disimulasikan melalui *quantum circuit* sebagai bagian dari proses forward modelling.
5. Simulasi kuantum dilakukan menggunakan simulator kuantum dan tidak mencakup implementasi langsung pada perangkat keras kuantum nyata.
6. Data yang digunakan berupa data sintetik hasil pemodelan numerik.
7. Evaluasi hasil simulasi dilakukan menggunakan parameter seperti *relative error*, *overlap state*, dan karakteristik propagasi gelombang.

8. Fungsi objektif digunakan sebagai ukuran kesesuaian data dalam kerangka inversi, tanpa membahas algoritma optimasi kuantum tingkat lanjut seperti *quantum annealing*, *Variational Quantum Eigensolver* (VQE), maupun *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA) secara mendalam.
9. Penelitian tidak membahas pemodelan dua dimensi (2-D) dan tiga dimensi (3-D), anisotropi, viskoelastisitas, maupun data seismik lapangan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang model simulasi kuantum untuk persamaan gelombang elastik satu dimensi menggunakan pendekatan *Schrödingerisation*.
2. Mengimplementasikan *source* dan mengevaluasi pengaruhnya terhadap evolusi gelombang elastik dalam simulasi kuantum.
3. Mengkaji penggunaan fungsi objektif sebagai metrik evaluasi kesesuaian antara hasil simulasi kuantum dan data referensi pada konteks inversi seismik.
4. Mengevaluasi kinerja simulasi kuantum melalui analisis *error*, *overlap state*, dan karakteristik propagasi gelombang.
5. Mengidentifikasi potensi serta keterbatasan simulasi kuantum sebagai pendekatan alternatif pada permasalahan inversi seismik satu dimensi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah kajian ilmiah mengenai penerapan komputasi kuantum pada simulasi gelombang elastik dan inversi seismik satu dimensi.

2. Memberikan pemahaman mengenai hubungan antara pendekatan *Schrödingerisation*, simulasi Hamiltonian, dan propagasi gelombang elastik dalam kerangka komputasi kuantum.
3. Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan di bidang geofisika komputasi, simulasi ilmiah kuantum, dan pengembangan metode inversi berbasis komputasi kuantum.
4. Menyediakan kerangka simulasi kuantum untuk gelombang elastik satu dimensi yang mengintegrasikan *source* dan fungsi objektif sebagai dasar pengembangan studi inversi seismik berbasis kuantum.
5. Memberikan evaluasi terhadap performa simulasi kuantum melalui analisis karakteristik propagasi gelombang, tingkat kesalahan (*error*), dan *overlap state* dibandingkan dengan solusi numerik klasik.
6. Menjadi dasar bagi pengembangan penelitian yang lebih kompleks pada kasus inversi seismik dua dimensi (2-D) dan tiga dimensi (3-D) serta implementasi pada platform komputasi kuantum yang lebih maju di masa mendatang.

1.6 Metode Pengumpulan Data

Untuk mencapai tujuan penelitian, pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur, observasi terhadap metodologi penelitian terdahulu, serta pelaksanaan simulasi numerik. Tahapan pengumpulan data dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur Berbasis Komputasi Kuantum

Studi literatur dilakukan dengan menelaah referensi ilmiah yang membahas simulasi gelombang seismik satu dimensi menggunakan komputasi kuantum, simulasi Hamiltonian untuk persamaan diferensial parsial, serta pendekatan *schrödingerisation*. Kajian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman men-

genai formulasi matematis, representasi kuantum *wavefield*, serta strategi implementasi *source* dan fungsi objektif dalam kerangka simulasi kuantum.

2. **Kajian Metodologi Simulasi Kuantum**

Kajian difokuskan pada metodologi simulasi gelombang elastik berbasis komputasi kuantum yang telah dikembangkan pada penelitian terdahulu. Observasi dilakukan terhadap alur transformasi persamaan gelombang ke dalam bentuk operator kuantum, skema evolusi waktu, serta mekanisme integrasi *source* dan fungsi objektif dalam sirkuit kuantum, yang selanjutnya dijadikan acuan dalam perancangan metode penelitian ini.

3. **Perancangan Model Sintetik Satu Dimensi**

Data penelitian diperoleh melalui perancangan model bawah permukaan satu dimensi yang bersifat sintetik dan disesuaikan dengan kebutuhan simulasi kuantum. Model ini digunakan sebagai representasi parameter fisik medium yang akan dipetakan ke dalam operator kuantum, serta sebagai dasar dalam evaluasi kemampuan simulasi kuantum dalam merepresentasikan perambatan gelombang elastik.

4. **Simulasi Gelombang Berbasis Komputasi Kuantum**

Simulasi gelombang seismik dilakukan menggunakan pendekatan simulasi kuantum atau simulator kuantum yang merepresentasikan evolusi *wavefield* satu dimensi. Proses ini mencakup implementasi *source*, sementara fungsi objektif dievaluasi setelah hasil simulasi direkonstruksi menjadi data seismik klasik, sehingga data yang dihasilkan berupa state kuantum atau besaran terukur yang berkaitan dengan dinamika gelombang dan respon medium.

5. **Analisis dan Evaluasi Hasil Simulasi Kuantum**

Data hasil simulasi kuantum dan proses inversi dianalisis untuk mengevaluasi kemampuan pendekatan komputasi kuantum dalam merepresentasikan perambatan dan inversi gelombang seismik satu dimensi. Evaluasi difokuskan pada akurasi rekonstruksi parameter, stabilitas terhadap noise, serta potensi

dan keterbatasan pendekatan kuantum dalam konteks aplikasi geofisika.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun untuk memberikan gambaran yang terstruktur mengenai alur pembahasan penelitian. Penulisan skripsi ini dibagi ke dalam tiga bab utama dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian yang menjelaskan urgensi kajian inversi gelombang seismik satu dimensi serta potensi pemanfaatan komputasi kuantum sebagai pendekatan alternatif dalam simulasi dan inversi gelombang. Selain itu, bab ini mencakup perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta metode pengumpulan data yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas kajian teori dan pustaka yang relevan dengan penelitian, meliputi konsep dasar gelombang seismik satu dimensi dan perambatannya dalam medium elastik, formulasi matematis persamaan gelombang dalam kerangka simulasi kuantum, serta prinsip dasar simulasi kuantum untuk persamaan diferensial parsial. Bab ini juga membahas konsep *quantum encoding wavefield*, evolusi sistem berbasis operator kuantum, serta perumusan *source* dan fungsi objektif dalam simulasi kuantum. Selain itu, disajikan pula ulasan penelitian terdahulu yang menjadi rujukan dalam pengembangan pendekatan inversi seismik berbasis komputasi kuantum.

BAB III: METODE PENELITIAN DAN PERANCANGAN SISTEM

Bab ini menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian yang dilakukan secara

sistematis. Pembahasan diawali dengan perancangan model bawah permukaan satu dimensi yang digunakan sebagai dasar simulasi. Selanjutnya, diuraikan proses pemetaan parameter fisik dan *wavefield* seismik ke dalam representasi kuantum, termasuk skema *quantum encoding* dan formulasi operator evolusi. Bab ini juga menjelaskan implementasi *wave source* dan perumusan fungsi objektif dalam kerangka simulasi kuantum untuk keperluan inversi. Pada bagian akhir, disajikan metode analisis dan evaluasi hasil inversi gelombang seismik satu dimensi berbasis simulasi sirkuit kuantum.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil model simulasi sirkuit kuantum untuk persamaan gelombang elastik satu dimensi beserta pembahasannya. Pembahasan diawali dengan hasil implementasi *source* dan Schrödingerisation pada sistem yang dibangun, dilanjutkan dengan perbandingan hasil simulasi kuantum terhadap solusi numerik klasik untuk menilai konsistensi representasi propagasi gelombang. Selanjutnya, dibahas peran fungsi objektif dalam mengevaluasi hasil simulasi dan mengarahkan proses inversi seismik satu dimensi, termasuk analisis sensitivitas hasil inversi terhadap *noise* pada data observasi dan pemilihan bobot regularisasi. Bab ini ditutup dengan pembahasan mengenai potensi dan keterbatasan pendekatan simulasi kuantum terhadap permasalahan inversi seismik satu dimensi.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari keseluruhan hasil penelitian, mencakup keberhasilan pembangunan model simulasi sirkuit kuantum untuk persamaan gelombang elastik satu dimensi, kesesuaian hasil simulasi terhadap solusi numerik klasik, serta efektivitas fungsi objektif dalam mengarahkan proses inversi. Selain itu, disajikan pula saran bagi pengembangan penelitian selanjutnya, baik dari sisi peningkatan skala sistem, variasi fungsi objektif dan metode optimasi, maupun pengujian pada data seismik yang lebih kompleks.