

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan salah satu metode geofisika non-destruktif yang banyak dimanfaatkan untuk mengkaji kondisi bawah permukaan dangkal. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan perambatan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi ke dalam medium dan merekam gelombang pantul yang muncul akibat adanya perbedaan sifat listrik material bawah permukaan. Karena kemampuannya memberikan informasi bawah permukaan secara cepat dan relatif detail tanpa merusak lingkungan pengukuran, GPR banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti geoteknik, hidrologi, arkeologi, serta studi lingkungan (Annan, 2005; Jol, 2009).

Salah satu parameter fisik penting yang dapat diperoleh dari data GPR adalah kecepatan rambat gelombang elektromagnetik. Parameter ini berhubungan langsung dengan nilai permitivitas relatif material dan memegang peranan penting dalam penentuan kedalaman reflektor serta interpretasi karakteristik lapisan bawah permukaan. Namun, dalam praktiknya penentuan kecepatan rambat gelombang dari data GPR masih menghadapi berbagai kendala. Data GPR mentah umumnya dipengaruhi oleh derau, efek multiple reflection, serta distorsi amplitudo akibat heterogenitas medium, sehingga proses estimasi kecepatan menjadi tidak sederhana. Metode konvensional, seperti analisis kurva hiperbola atau inversi berbasis model fisika, sering kali memerlukan asumsi awal tertentu serta proses iteratif yang cukup kompleks.

Selain kompleksitas tersebut, metode konvensional juga memiliki keterbatasan dari sisi efisiensi komputasi. Ketika diterapkan pada data GPR dengan jumlah trace yang besar dan struktur bawah permukaan yang kompleks, waktu komputasi yang dibutuhkan menjadi relatif tinggi. Ketergantungan terhadap model awal juga dapat memengaruhi kestabilan hasil estimasi, sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang lebih adaptif dan berbasis data.

Perkembangan kecerdasan buatan, khususnya *deep learning*, membuka peluang baru dalam pemrosesan dan pemodelan data geofisika. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan pada data GPR adalah *Convolutional Neural Network* (CNN), karena kemampuannya dalam mengekstraksi fitur lokal secara otomatis dari sinyal radargram. Berdasarkan pendekatan tersebut, (Leong & Zhu, 2021) mengembangkan arsitektur GPRNet sebagai jaringan CNN satu dimensi untuk mempelajari hubungan antara sinyal GPR dan model kecepatan gelombang elektromagnetik. Hasil penelitian tersebut

menunjukkan bahwa GPRNet mampu menghasilkan estimasi kecepatan dengan akurasi yang baik serta waktu komputasi yang lebih efisien dibandingkan pendekatan konvensional berbasis inversi.

Meskipun demikian, CNN memiliki keterbatasan mendasar yang berkaitan dengan sifat *receptive field* yang bersifat lokal. Pada data GPR, respon refleksi pada satu trace GPR tidak hanya dipengaruhi oleh informasi lokal pada beberapa sampel yang berdekatan, tetapi juga oleh hubungan antar sampel yang berjauhan (*long-range dependency*). CNN murni cenderung kurang optimal dalam menangkap ketergantungan jarak jauh (*long-range dependency*), sehingga representasi struktur bawah permukaan yang kompleks belum sepenuhnya dapat dimodelkan secara menyeluruh (Ge et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir, arsitektur Transformer mulai banyak digunakan dalam pemodelan data sekuensial karena kemampuannya dalam menangkap hubungan global melalui mekanisme *self-attention*. Berbeda dengan CNN yang bergantung pada operasi konvolusi berlapis, Transformer dapat memodelkan keterkaitan antarbagian data secara langsung. Pendekatan ini relevan untuk data GPR yang bersifat *time-series*, sehingga mampu mempelajari hubungan global antar sampel waktu pada setiap trace GPR. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa mekanisme *attention* mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi pemodelan sinyal fisik yang kompleks, termasuk pada aplikasi geofisika (Vaswani et al., 2017; Ge et al., 2024).

Namun demikian, sebagian besar penelitian yang mengaplikasikan Transformer pada data GPR masih berfokus pada penggunaan Transformer secara murni atau penggabungannya dengan jaringan dua dimensi. Penelitian yang secara khusus mengimplementasikan keunggulan CNN sebagai pengeksktraksi fitur lokal dengan Transformer sebagai pemodel hubungan global dalam kerangka arsitektur GPRNet, khususnya pada proses inversi kecepatan menggunakan data GPR sintetis satu dimensi masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang layak untuk dikembangkan.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana mengimplementasikan Transformer pada arsitektur GPRNet untuk pemodelan kecepatan gelombang elektromagnetik?
2. Bagaimana kinerja GPRNet dengan penambahan Transformer dibandingkan dengan GPRNet berbasis CNN berdasarkan evaluasi kuantitatif?
3. Bagaimana perbandingan hasil prediksi kecepatan gelombang elektromagnetik antara GPRNet dengan penambahan Transformer dan GPRNet berbasis CNN berdasarkan analisis kualitatif?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian tetap terfokus, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan berupa data sintetik GPR satu dimensi yang disusun untuk pemodelan kecepatan.
2. Arsitektur dasar yang digunakan adalah GPRNet berbasis CNN satu dimensi.
3. Pengembangan arsitektur dibatasi pada penambahan satu blok Transformer.
4. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan metrik MSE dan R^2 .

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan arsitektur GPRNet-Transformer untuk pemodelan kecepatan gelombang elektromagnetik data GPR.
2. Mengevaluasi kinerja model menggunakan parameter Mean Squared Error (MSE) dan koefisien determinasi (R^2).
3. Menganalisis pengaruh penambahan Transformer terhadap hasil pemodelan kecepatan gelombang elektromagnetik berdasarkan perbandingan profil hasil prediksi dengan ground truth.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan metode *deep learning* untuk pemrosesan dan pemodelan data Ground Penetrating Radar.
2. Menyediakan pendekatan alternatif arsitektur CNN-Transformer yang berpotensi meningkatkan kualitas pemodelan kecepatan gelombang elektromagnetik dibandingkan metode CNN murni.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang mengkaji implementasi CNN dan Transformer pada data geofisika, khususnya data GPR.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian tugas akhir ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai alur pembahasan secara keseluruhan. Penulisan ini terdiri dari lima bab, dengan sistematika sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan, berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka, membahas teori-teori pendukung dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan Ground Penetrating Radar (GPR), estimasi kecepatan gelombang elektromagnetik, Convolutional Neural Network (CNN), Transformer, serta arsitektur GPRNet sebagai dasar pengembangan model yang diusulkan.

Bab III Metodologi Penelitian, menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan, meliputi data yang digunakan, perancangan arsitektur GPRNet berbasis CNN–Transformer, proses pelatihan model, serta metode evaluasi kinerja model.

Bab IV Hasil dan Pembahasan, menyajikan hasil pemodelan kecepatan gelombang elektromagnetik menggunakan arsitektur yang diusulkan, analisis kinerja model berdasarkan parameter evaluasi, serta pembahasan hasil penelitian.

Bab V Kesimpulan dan Saran, berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

