

---

## 1. Pendahuluan

### Latar Belakang

Pipeline tetap menjadi metode yang paling efisien dan hemat biaya untuk mengangkut gas alam [1]. Meskipun memiliki keunggulan ini, pipeline dapat mengalami penuaan seiring waktu [2], yang menyebabkan korosi [3] dan degradasi, sehingga berpotensi menimbulkan kebocoran kecil [4]. Kebocoran kecil ini dapat terakumulasi dalam jangka waktu lama, menyebabkan kontaminasi lingkungan yang parah serta kerugian ekonomi yang signifikan [5]. Untuk mengatasi permasalahan ini, implementasi sistem pemantauan yang akurat sangat penting guna mencegah potensi kerugian [6], yang dapat dicapai melalui teknik machine learning yang canggih, khususnya pendekatan unsupervised learning [7].

Unsupervised learning berfokus pada deteksi anomali sebagai salah satu tugas utamanya [8]. Dengan menganalisis pola dan informasi mendasar dalam data, sistem deteksi anomali dapat belajar mengenali perilaku normal dari suatu sistem dan mengidentifikasi pola data yang abnormal. Pendekatan deteksi anomali mencakup berbagai metode, mulai dari teknik statistik konvensional hingga teknik deep learning yang lebih canggih [8], [9]. Metode deteksi saat ini sangat diuntungkan dari kemampuan deep learning dalam merepresentasikan pola data yang kompleks. Sistem ini bekerja dengan merekonstruksi data input melalui representasi jaringan saraf dalam (deep neural networks), di mana error rekonstruksi yang besar dapat mengindikasikan adanya anomali. Aplikasi dari metode ini telah diterapkan dalam berbagai konfigurasi jaringan saraf, dengan autoencoder menjadi salah satu arsitektur yang paling umum digunakan [9], [10].

Autoencoder berfungsi sebagai jaringan saraf buatan yang dilatih dalam mode unsupervised pada data mentah atau yang telah diproses serta mampu mempelajari hubungan kompleks antar fitur dalam data [11], [12]. Autoencoder mempelajari representasi laten melalui arsitektur encoder dan decoder [13] dengan cara merekonstruksi input [14]. Saat pengujian, deviasi yang signifikan dalam error rekonstruksi dapat menunjukkan perilaku atau kejadian anomali. Namun, autoencoder tunggal sering kali sensitif terhadap kualitas data dan proses preprocessing, serta mungkin tidak mampu melakukan generalisasi dengan baik terhadap input yang mengandung noise [15], sehingga diperlukan pendekatan yang lebih inovatif [16].

Penelitian telah menunjukkan bahwa ensemble learning secara efektif dapat meningkatkan performa dan keandalan sistem deteksi anomali. Dengan menggabungkan beberapa model, ensemble learning memanfaatkan keragaman serta keunggulan komplementer dari setiap model untuk mencapai deteksi yang lebih akurat dan andal [16], [17]. Oleh karena itu, pendekatan Ensemble of Autoencoders (EoAE) mengintegrasikan beberapa model autoencoder untuk deteksi anomali. EoAE bekerja dengan cara yang mirip dengan autoencoder tunggal, tetapi memiliki keunggulan dalam melatih beberapa model secara independen atau secara bersamaan serta menggabungkan outputnya untuk mendapatkan hasil deteksi akhir [18].

Penelitian ini mengusulkan penggunaan Ensemble of Autoencoders (EoAE) untuk mendeteksi anomali dalam data operasional pipeline gas alam dengan mengintegrasikan tiga arsitektur autoencoder yang berbeda melalui metode averaging ensemble. Sistem ini menggabungkan error rekonstruksi dari masing-masing autoencoder untuk menghitung skor anomali, di mana skor yang lebih tinggi menunjukkan deviasi yang lebih besar dari pola operasional normal. Melalui optimasi detection threshold dan integrasi kemampuan autoencoder yang saling melengkapi, pendekatan yang diusulkan ini membangun kerangka kerja deteksi anomali yang lebih andal, yang dirancang khusus untuk aplikasi pemantauan pipeline guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.