

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan Industri 4.0 mendorong integrasi teknologi digital ke dalam proses manufaktur untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan inovasi. Salah satu elemen kunci dalam transformasi ini adalah *Internet of Things (IoT)*, yang menjadi sumber utama peningkatan volume data industri. Perangkat *IoT* menghasilkan *Big Data* dalam jumlah besar yang perlu dianalisis untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data *real-time* (Naghieb dkk., 2023; Nosalska dkk., 2020). Tantangan utama yang muncul adalah bagaimana menyimpan, memproses, dan menganalisis data dalam skala besar dan kompleks, di mana metode komputasi tradisional tidak lagi memadai.

Beberapa pendekatan arsitektur komputasi telah muncul untuk mengatasi tantangan tersebut. Dua pendekatan arsitektur yang paling umum adalah *Cloud Computing*, yang menawarkan kapasitas komputasi dan penyimpanan masif secara terpusat dan skalabel (Evjemo dkk., 2020), namun memiliki keterbatasan berupa latensi tinggi dan ketergantungan pada konektivitas jaringan (Berisha dkk., 2022). Pendekatan lainnya adalah *Edge Computing*, yang memindahkan pemrosesan data lebih dekat ke sumbernya untuk mengurangi latensi dan memberikan respons cepat (Carvalho dkk., 2021), namun di sisi lain memiliki keterbatasan daya komputasi dan kapasitas penyimpanan. Muncul pendekatan ketiga, yaitu arsitektur *Hybrid*, untuk menjembatani kesenjangan antara kedua arsitektur tersebut. Arsitektur ini dirancang untuk menciptakan sistem yang optimal dengan menggabungkan manfaat dari kedua

paradigma komputasi (*Edge* dan *Cloud*). Tujuannya adalah untuk menyeimbangkan berbagai *trade-off*, mulai dari latensi, penggunaan *bandwidth*, skalabilitas, hingga privasi. Model *Hybrid* ini dinilai sangat berguna untuk aplikasi yang memerlukan respons latensi rendah, seperti otomasi industri atau sistem darurat, sekaligus memerlukan manajemen *bandwidth* yang efisien untuk menghindari komunikasi berlebihan ke *cloud* (Andriulo dkk., 2024).

Landasan teoritis untuk perbandingan arsitektur komputasi modern telah diletakkan oleh penelitian sebelumnya (Bajic dkk., 2019), yang secara konseptual mengidentifikasi tiga metrik evaluasi krusial yaitu kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi, namun tidak melengkapinya dengan validasi eksperimental. Sejumlah studi lanjutan telah berupaya mengisi kekosongan ini melalui pengujian empiris, namun seringkali dengan cakupan atau fokus yang berbeda. Sebagai contoh, pada penelitian sebelumnya (Loghin dkk., 2019) membandingkan ketiga arsitektur (*Cloud*, *Edge*, dan *Hybrid*), tetapi evaluasinya terfokus pada metrik *processing time* dan *bandwidth* untuk aplikasi *MapReduce*, yang memiliki karakteristik beban kerja berbeda dari analitik manufaktur. Studi sebelumnya juga menyajikan perbandingan antara *Edge* dan *Cloud* dengan metrik latensi, biaya, dan efisiensi energi untuk aplikasi seperti sistem pengawasan video dan *Augmented Reality*, namun tidak menyertakan arsitektur *Hybrid* dan tidak menyentuh kasus penggunaan industri (Elizabeth, 2023).

Studi lain memiliki keterbatasan pada jumlah arsitektur yang dibandingkan. Walani & Doorsamy (2025) hanya mengevaluasi arsitektur *Edge* dan *Cloud* dalam konteks pemantauan kondisi, dengan metrik yang lebih berorientasi pada performa

model *machine learning* seperti *F1 Score* dan waktu inferensi, bukan pada performa infrastruktur secara menyeluruh. Penelitian yang paling mendekati adalah yang dilakukan oleh Narendra Pamadi & Singh (2025), yang menganalisis ketiga arsitektur menggunakan metrik serupa seperti latensi dan kekuatan komputasi. Perbedaan mendasar terletak pada domain studi kasusnya, yang berfokus pada sektor kesehatan, kendaraan otonom, dan *smart cities*, bukan pada lingkungan manufaktur yang menjadi inti dari penelitian ini. Lanskap penelitian yang ada secara kolektif menunjukkan sebuah kesenjangan yang jelas: belum adanya analisis perbandingan eksperimental yang secara spesifik menguji arsitektur *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* secara bersamaan menggunakan metrik gabungan kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi dalam studi kasus *predictive maintenance* untuk Industri 4.0.

Masih ada kesenjangan penelitian dari penelitian-penelitian tersebut, yaitu kurangnya studi eksperimental langsung yang membandingkan kinerja arsitektur *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* dalam konteks analitik data di industri manufaktur, terutama dengan mempertimbangkan parameter penyimpanan data, daya komputasi, dan latensi. Parameter ini diambil dari penelitian Bajic dkk. yang telah dijelaskan sebelumnya, yang juga menjadi basis penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan merancang dan melakukan simulasi pengujian pada ketiga arsitektur tersebut. Hasil yang diperoleh diharapkan mampu memberikan bukti empiris yang dapat menjadi dasar pemilihan arsitektur komputasi yang optimal untuk mendukung kebutuhan analitik data secara *real-time* dan *predictive maintenance* dalam ekosistem Industri 4.0.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini dirumuskan untuk mengkaji perbandingan performa berbagai arsitektur komputasi dalam konteks Industri 4.0. Fokus utamanya adalah bagaimana *Edge*, *Cloud*, dan arsitektur *Hybrid* menghadapi tantangan terkait penyimpanan data, kekuatan komputasi, dan latensi. Dua pertanyaan utama disusun sebagai dasar untuk menjawab tujuan penelitian ini:

1. Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi performa arsitektur *Edge Computing*, *Cloud Computing*, dan *Hybrid* dalam hal kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi untuk mendukung proses analitik data pada industri manufaktur berbasis Industri 4.0?
2. Bagaimana merumuskan strategi pemilihan arsitektur komputasi yang optimal (*Edge*, *Cloud*, atau *Hybrid*) dengan mengevaluasi faktor-faktor kinerja kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi dalam konteks kebutuhan analitik data manufaktur?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini disusun untuk menjawab Rumusan Masalah yang telah ditentukan. Tujuan-tujuan berikut dirancang secara spesifik agar selaras dengan fokus analisis dan ruang lingkup penelitian. Berikut tujuan-tujuan tersebut:

1. Mengevaluasi dan membandingkan performa tiga arsitektur komputasi (*Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid*) berdasarkan parameter kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi melalui pendekatan eksperimen berbasis simulasi pada sistem manufaktur berbasis Industri 4.0.

2. Merumuskan strategi pemilihan arsitektur komputasi yang optimal untuk kebutuhan analitik data manufaktur, dengan mempertimbangkan faktor-faktor performa kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Teoretis:
 - a. Memberikan kontribusi ilmiah dalam kajian arsitektur komputasi untuk analitik data di Industri 4.0, khususnya melalui pendekatan eksperimen berbasis simulasi.
 - b. Memperluas literatur terkait perbandingan performa *Edge Computing*, *Cloud Computing*, dan *Hybrid Computing* dalam hal penyimpanan data, kekuatan komputasi, dan latensi.
 - c. Menjadi dasar teoretis untuk penelitian lanjutan yang ingin mengkaji pengaruh pemilihan arsitektur komputasi terhadap efisiensi pemrosesan data dalam skala industri.
2. Manfaat Praktis
 - a. Memberikan acuan bagi perusahaan manufaktur dalam memilih arsitektur komputasi yang optimal sesuai kebutuhan dan karakteristik data mereka.
 - b. Menyediakan wawasan aplikatif untuk pengelolaan data secara efisien dalam konteks pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) dan analitik data *real-time*.

- c. Mendukung pengambilan keputusan berbasis data dengan memahami kelebihan dan keterbatasan masing-masing pendekatan komputasi (*Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid*).

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini tidak membahas aspek keamanan data pada implementasi *Edge Computing* maupun *Cloud Computing*. Fokus utama terbatas pada parameter performa: penyimpanan data, kekuatan komputasi, dan latensi.
2. Penelitian ini menggunakan *dataset* publik "*AI4I 2020 Predictive Maintenance*" yang bersifat sintesis. Pemilihan data sintesis ini merupakan keputusan metodologis yang diambil secara sadar dengan pertimbangan sebagai akan kesulitan praktis dalam memperoleh data operasional dari lingkungan industri riil yang seringkali bersifat sensitif dan rahasia (*proprietary*), dan kebutuhan akan *dataset* yang terkontrol untuk menjamin perbandingan kinerja yang adil antar arsitektur. Hasil dari penelitian ini perlu divalidasi lebih lanjut pada data produksi dunia nyata untuk generalisasi yang lebih luas meskipun *dataset* ini dirancang untuk merepresentasikan skenario industri.