

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Industri 4.0

Industri 4.0 adalah revolusi industri keempat yang menandai peralihan dari proses produksi konvensional menuju digitalisasi menyeluruh. Konsep ini menekankan integrasi teknologi digital, otomatisasi, dan konektivitas dalam sistem produksi untuk membentuk ekosistem yang cerdas dan adaptif (Widayani & Yuniarti, 2021). Istilah “Industri 4.0” pertama kali diperkenalkan oleh pemerintah Jerman pada *Hannover Messe* 2011 sebagai inisiatif nasional dengan pendanaan besar untuk riset dan pengembangan transformasi industri (Prasetyo & Sutopo, 2019).

Industri 4.0 dalam praktiknya menghadirkan sistem *smart manufacturing* berbasis teknologi seperti robotik, *Internet of Things (IoT)*, dan kecerdasan buatan. Proses digital ini menghasilkan data dalam jumlah besar yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan berbasis data. *IoT* memainkan peran penting dalam menghubungkan perangkat produksi dan mengumpulkan data secara *real-time* untuk mendukung efisiensi, akurasi, dan otomatisasi proses produksi (Khan & Javaid, 2022).

2.1.2 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah jaringan perangkat fisik yang saling terhubung melalui internet dan dapat saling berkomunikasi tanpa campur tangan manusia.

Perangkat ini dilengkapi sensor dan kemampuan komputasi yang memungkinkan mereka mengumpulkan, mengirim, dan menerima data (Atzori dkk., 2010).

IoT dalam industri manufaktur menjadi fondasi sistem produksi modern. Perangkat seperti sensor mesin, kamera pengawas, dan kontrol otomatis terintegrasi untuk meningkatkan efisiensi, meminimalkan kesalahan, dan memungkinkan deteksi serta respons cepat terhadap gangguan operasional (Belli dkk., 2019). *IoT* juga menjadi penghubung utama dengan teknologi lain seperti *Big Data*, *Cloud Computing*, dan *Edge Computing*. Data dari *IoT* menjadi bahan baku untuk analisis lanjutan di kedua platform tersebut guna mendukung pengambilan keputusan berbasis data (Y. Chen, 2020).

2.1.3 *Big Data*

Big Data adalah istilah untuk menyebut kumpulan data yang sangat besar, kompleks, dan terus berkembang, sehingga sulit diolah dengan metode konvensional. Karakteristik utama *Big Data* dijelaskan melalui *5V*: *Volume*, *Velocity*, *Variety*, *Veracity*, dan *Value* (Munawar dkk., 2020), namun tidak ada definisi tunggal yang disepakati dalam komunitas akademik (Favaretto dkk., 2020).

Big Data berperan sebagai elemen kunci dalam analitik data industri. Data yang dihasilkan oleh perangkat *IoT* seperti sensor dan mesin pintar mencerminkan performa operasional secara *real-time*. Perusahaan dapat mendeteksi pola, memprediksi kegagalan, serta mengoptimalkan proses produksi melalui analisis *Big Data* (Khare & Totaro, 2019). *Cloud Computing* memberikan infrastruktur penyimpanan dan pemrosesan berskala besar untuk data ini, sementara *Edge*

Computing mendukung analisis cepat di dekat sumber data untuk mengatasi kendala latensi dan *bandwidth* (Babar dkk., 2023). *Big Data* memungkinkan transformasi digital melalui pengambilan keputusan yang lebih tepat dan responsif.

2.1.4 Data Analytics dan Predictive Maintenance

Data *Analytics* merupakan proses pengumpulan, pengolahan, dan analisis data untuk memperoleh wawasan yang mendukung pengambilan keputusan. Teknologi ini berperan penting dalam Industri 4.0 karena mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan produksi, dan mendorong inovasi (Duan & Da Xu, 2021). Empat kategori utama dalam analitik data meliputi analisis deskriptif, diagnostik, prediktif, dan preskriptif.

Sistem produksi modern memanfaatkan Data *Analytics* untuk mengolah data dari sensor dan mesin pintar. Analisis ini mendeteksi pola, memprediksi kegagalan, dan mengatur jadwal perawatan mesin secara lebih akurat. Integrasi dengan *Cloud Computing* dan *Machine Learning* mempercepat pemrosesan data dan mendukung pengambilan keputusan berbasis prediksi (Bousdekis dkk., 2023). Perusahaan manufaktur yang menerapkan analitik data secara optimal dapat meningkatkan daya saing, menekan biaya, serta mempercepat inovasi.

Predictive Maintenance dalam Industri 4.0 memanfaatkan data analytics mengoptimalkan proses manufaktur (Sang dkk., 2020). *Predictive Maintenance* ini melibatkan pendeteksian, dan diagnosis kesalahan pada mesin menggunakan berbagai analisis untuk memperkirakan Sisa Masa Pakai (*Remaining Useful Life*) (Sang dkk., 2021). *Predictive Maintenance* bertujuan untuk mengurangi waktu

henti, biaya operasional, dan meningkatkan produktivitas di berbagai sektor manufaktur (Mallioris dkk., 2024). Tinjauan sistematis aplikasi *Predictive Maintenance* di berbagai industri mengungkap meningkatnya minat terhadap solusi berbasis data dan menyoroti perlunya pendekatan multidisiplin yang menggabungkan ilmu komputer dan keahlian teknik untuk mengatasi tantangan Industri 4.0 secara efektif (Zonta dkk., 2020).

2.1.5 *Edge Computing*

Edge Computing adalah paradigma komputasi yang memindahkan pemrosesan data lebih dekat ke sumber data, seperti perangkat *IoT* atau sensor (Cao dkk., 2020). Pendekatan ini memungkinkan pemrosesan lokal untuk mengurangi latensi dan meningkatkan respons sistem secara *real-time* dalam lingkungan industri.

Cloud Computing memproses data di pusat data terpusat, sedangkan *Edge Computing* melakukannya secara lokal. Pemrosesan di *Edge* mengurangi beban jaringan, menghemat *bandwidth*, dan mendukung aplikasi yang membutuhkan reaksi cepat seperti kendali mesin di lini produksi (Shi dkk., 2016). *Edge Computing* menyaring data sebelum dikirim ke *Cloud*, tetapi memiliki keterbatasan dalam kapasitas komputasi dan penyimpanan.

Integrasi antara *Edge Computing*, *IoT*, dan *Big Data* menghasilkan sistem manufaktur yang cerdas dan adaptif. Perusahaan dapat menerapkan pemeliharaan prediktif dan pengendalian kualitas secara efisien. Paradigma ini menjadi solusi penting untuk memenuhi kebutuhan analitik *real-time* di Industri 4.0.

2.1.6 *Cloud Computing*

Cloud Computing adalah paradigma komputasi berbasis internet yang menyediakan akses ke sumber daya teknologi informasi seperti server, penyimpanan, dan jaringan secara *on-demand*. Konsep ini memiliki lima karakteristik utama menurut definisi *NIST* (*National Institute of Standards and Technology*), yaitu *on-demand self-service*, *broad network access*, *resource pooling*, *rapid elasticity*, dan *measured service* (Peter Mell, 2016).

Industri manufaktur memanfaatkan *Cloud Computing* untuk menyimpan dan menganalisis data skala besar yang dihasilkan oleh perangkat *IoT*. Teknologi ini mendukung *machine learning* untuk prediksi kerusakan mesin dan peningkatan efisiensi produksi (M. Chen dkk., 2014). *Cloud Computing* juga memungkinkan kolaborasi lintas sistem dalam satu ekosistem digital yang terpadu.

Keunggulan utamanya terletak pada skalabilitas dan efisiensi biaya, dengan dukungan pembayaran berbasis konsumsi (Armbrust dkk., 2010). Meskipun menghadapi tantangan seperti ketergantungan jaringan dan latensi, integrasi dengan *Edge Computing* mengatasi kendala tersebut. *Cloud Computing* tetap menjadi komponen utama dalam transformasi digital Industri 4.0.

2.1.7 *Arsitektur Hybrid*

Arsitektur *Hybrid* yang dimaksud adalah gabungan antara paradigma komputasi *Edge* dan *Cloud*. Arsitektur *Hybrid* menggabungkan manfaat komputasi *edge* dan komputasi awan untuk menciptakan sistem yang optimal. Arsitektur ini bertujuan untuk menyeimbangkan latensi, penggunaan *bandwidth*, skalabilitas, dan

privasi dengan memanfaatkan kedua paradigma komputasi. Model *Hybrid* ini sangat berguna untuk aplikasi yang memerlukan respons latensi rendah (seperti otomasi industri atau sistem darurat), serta aplikasi yang memerlukan manajemen *bandwidth* yang efisien untuk menghindari komunikasi *cloud* yang berlebihan (Andriulo dkk., 2024).

2.1.8 Metrik Evaluasi

Metrik evaluasi sesuai dengan yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu kekuatan komputasi, penggunaan penyimpanan, dan latensi. Metrik tersebut terpecah lagi menjadi beberapa parameter yang lebih spesifik. Kekuatan komputasi mencakup rata-rata persentase utilisasi *CPU* dan penggunaan *RAM*, penggunaan penyimpanan mencakup rata-rata *Write IOPS* dan ukuran data di *disk* dalam satuan *Megabytes (MB)*, dan latensi mencakup *end-to-end latency*. Ketiga metrik evaluasi ini diambil dari penelitian Bajic dkk. yang merupakan basis penelitian ini.

Utilisasi *CPU* dan *RAM* diukur pada arsitektur yang berbeda, yaitu *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid*. Rata-rata penggunaan *CPU* dan *RAM* pada perangkat *edge* diukur dengan menggunakan *psutil*. Untuk platform *Cloud*, diukur menggunakan *AWS CloudWatch*, alat *monitoring* yang terintegrasi langsung di *AWS* untuk memperoleh penggunaan sumber daya saat aplikasi berjalan (Das dkk., 2018). Arsitektur *hybrid* menggunakan gabungan antara kedua *tools* yang ada di arsitektur *Edge* dan *Cloud*.

Write IOPS dan ukuran data pada *disk* juga diukur pada arsitektur yang berbeda. Pada arsitektur *edge*, digunakan *psutil* untuk mengukur *Write IOPS* dan

fitur bawaan dari *database SQLite3* untuk menghitung ukuran data dalam satuan *MB*. Untuk platform *Cloud*, digunakan *AWS CloudWatch* dengan metrik *WriteIOPS* untuk mengukur *Write IOPS* dan menggunakan fitur bawaan *MySQL* untuk menghitung ukuran data di *disk* dengan satuan *MB*. Perlu diketahui bahwa formula untuk menghitung *Write IOPS*, yaitu $IOPS = 1 / (\text{waktu pencarian rata-rata} + \text{latensi rotasi rata-rata})$ tidak digunakan oleh *psutil* dan *CloudWatch* (Sarkar & Kundu, 2020). *Tools* tersebut mengukur langsung dari jumlah operasi I/O mentah, bukan dari karakteristik perangkat keras *disk* seperti waktu pencarian atau latensi rotasi.

Latensi *end-to-end* adalah perbedaan antara waktu ketika input di-*publish*, lalu diterima oleh perangkat di tiap arsitektur, dan waktu ketika hasil akhir tersimpan di penyimpanan (Das dkk., 2018). Ketiga metrik evaluasi inilah yang digunakan untuk melihat performa dari tiap arsitektur.

2.2 Penelitian Terkait dan Kebaruan Penelitian

2.2.1 Tabel *Literature Review* (Tinjauan Pustaka)

Tabel II.1 Literature Review

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
1	(Sahal dkk., 2020)	<i>Big Data dan Stream Processing Platforms for Industry 4.0 Requirement Mapping for a Predictive Maintenance Use Case</i>	Tantangan pemilihan teknologi untuk <i>predictive maintenance</i>	Kerangka pemetaan kebutuhan dan teknologi <i>open-source</i>	Panduan implementasi teknologi <i>Big Data</i> untuk <i>predictive maintenance</i>
2	(Prajapati & Alam, 2022)	<i>A Review of Data Analytics in IoT</i>	Beban jaringan tinggi dan keterbatasan komputasi <i>edge</i>	Integrasi <i>edge-cloud</i> untuk efisiensi dan latensi rendah	Pemrosesan efisien data <i>IoT</i> dengan pemisahan beban analitik
3	(Oluwole Temidayo Modupe dkk., 2024)	<i>Reviewing The Transformational Impact of Edge Computing on Real-time Data Processing and Analytics</i>	Latensi tinggi dan ketergantungan pusat data	<i>Edge</i> processing di dekat sumber data	<i>Edge</i> sebagai solusi <i>real-time</i> untuk efisiensi dan kecepatan
4	(Singh dkk., 2020)	<i>Cloud Computing for Industry 4.0</i>	Transisi manufaktur tradisional ke otomatis	Integrasi <i>cloud</i> untuk otomatisasi dan fleksibilitas	Pemanfaatan <i>cloud</i> dalam sistem manufaktur cerdas
5	(Hussain dkk., 2020)	<i>Analyzing the Performance of Smart Industry 4.0 Applications on Cloud Computing Systems</i>	Ketidakpastian waktu inferensi <i>DNN</i> di <i>cloud</i>	Model inferensi berbasis waktu dan <i>MIPS</i>	Pendekatan <i>QoS</i> berbasis inferensi untuk industri kritis
6	(Gautam, 2023)	<i>Comparison of Edge and Cloud Computing Technology for Industry 4.0 Perspective on the Future</i>	Tantangan latensi dan jaringan <i>cloud</i>	<i>Edge processing</i> untuk mengurangi ketergantungan jaringan	Pergeseran dari <i>cloud</i> ke <i>edge</i> untuk efisiensi data besar
7	(Mr Kuldeep dkk., 2022)	<i>Study of Edge Computing on Cloud Infrastructure and Application Performance</i>	Latensi dan hambatan <i>real-time</i> di <i>cloud</i>	<i>Edge</i> untuk pemrosesan cepat di sumber	Penekanan efisiensi <i>edge</i> untuk aplikasi <i>real-time</i>

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
8	(Munmun dkk., 2022)	<i>A Comprehensive Comparison Between Cloud Computing and Mobile Edge Computing</i>	Keterbatasan <i>cloud</i> pada <i>bandwidth</i> dan keamanan	Mobile <i>Edge Computing</i> untuk efisiensi dan keamanan	MEC sebagai solusi optimal untuk data <i>IoT</i> sensitif waktu
9	(Unnisa & Roshan, 2020)	<i>A Study on Review and Analysis of Cloud, Fog and Edge Computing Platforms</i>	Tantangan efisiensi dan keandalan <i>cloud/fog</i>	Fog <i>computing</i> untuk keamanan dan latensi rendah	Perbandingan platform untuk kebutuhan data sensitif
10	(Shende & Chinchamatpure, 2022)	<i>A Comparative Study on Edge Computing & Cloud Computing</i>	Tantangan latensi dan data besar <i>cloud</i>	<i>Edge</i> processing di dekat sumber <i>IoT</i>	<i>Edge</i> sebagai solusi efisien untuk <i>real-time IoT</i>
11	(Saini dkk., 2021)	<i>Edge Computing in Cloud Computing Environment: Opportunities and Challenges</i>	Keterbatasan <i>cloud</i> untuk data <i>IoT real-time</i>	<i>Edge</i> untuk efisiensi dan latensi rendah	<i>Edge</i> sebagai pelengkap <i>cloud</i> untuk respons cepat
12	(Küfner dkk., 2021)	<i>Vertical data continuity with lean edge analytics for industry 4.0 production</i>	Latensi tinggi dan <i>bandwidth</i> pada data terpusat	<i>Edge analytics</i> untuk pemrosesan langsung di perangkat	Integrasi <i>lean analytics</i> untuk efisiensi data <i>real-time</i>
13	(Odunayo Josephine Akindote dkk., 2023)	<i>Innovation in Data Storage Technologies: From Cloud Computing to Edge Computing</i>	Tantangan pengelolaan penyimpanan data dalam skala besar dengan latensi rendah	Peralihan ke <i>cloud</i> dan <i>edge</i> untuk efisiensi dan pemrosesan <i>real-time</i>	Penggunaan <i>cloud</i> dan <i>edge</i> sebagai teknologi penyimpanan modern yang efisien dan skalabel
14	(Bajic dkk., 2023)	<i>Edge Computing Data Optimization for Smart Quality Management: Industry 5.0 Perspective</i>	Konsumsi energi tinggi dan efisiensi digital rendah	Pengoptimalan data dengan <i>edge computing</i>	Reduksi volume data signifikan tanpa kehilangan informasi penting
15	(Laroui dkk., 2021)	<i>Edge and Fog Computing for IoT: A Survey on Current Research Activities & Future Directions</i>	<i>Cloud</i> tidak memenuhi kebutuhan <i>real-time IoT</i>	Peran <i>edge</i> dan fog untuk proses desentralisasi	<i>Edge</i> dan fog efisien untuk smart city dan healthcare dengan latensi rendah
16	(Uddin & Ahmad, 2020)	<i>A Review on Edge to Cloud: Paradigm Shift from Large Data Centers to Small Centers of Data Everywhere</i>	<i>Cloud</i> terbatas untuk aplikasi <i>IoT real-time</i>	Integrasi <i>edge-cloud</i> untuk distribusi pemrosesan	Arsitektur <i>edge</i> mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi aplikasi <i>IoT</i>

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
17	(Kubiak dkk., 2022a)	<i>Possible Applications of Edge Computing in the Manufacturing Industry – Systematic Literature Review</i>	Tantangan latensi, energi, dan kontrol kualitas	<i>Edge</i> untuk analisis <i>real-time</i> di lokasi produksi	<i>Edge</i> diterapkan untuk <i>monitoring</i> , digital twin, dan produksi otomatis
18	(Vo dkk., 2022)	<i>Edge, Fog, and Cloud Computing: An Overview on Challenges and Applications</i>	<i>Cloud</i> tradisional tidak efisien untuk data <i>real-time</i>	<i>Edge</i> dan fog untuk pengolahan efisien di dekat sumber	<i>Edge</i> cocok untuk smart cities dan healthcare yang sensitif waktu
19	(Saeik dkk., 2021)	<i>Task Offloading in Edge and Cloud Computing: A Survey on Mathematical, Artificial Intelligence, and Control Theory Solutions</i>	Latensi tinggi dan <i>cloud</i> tidak cocok untuk aplikasi waktu nyata	<i>Offloading</i> ke <i>edge</i> dengan algoritma AI dan kontrol	<i>Offloading</i> efisien dengan teori matematis dan kecerdasan buatan
20	(Guha Roy, 2023)	<i>BlockEdge: A Privacy-Aware Secured Edge Computing Framework Using Blockchain for Industry 4.0</i>	Privasi dan keamanan data di <i>edge</i>	<i>Blockchain</i> untuk autentikasi terdistribusi	Keamanan dan kontrol akses tinggi melalui integrasi <i>blockchain</i>
21	(Hamdan dkk., 2020)	<i>Edge-Computing Architectures for Internet of Things Applications: A Survey</i>	<i>Cloud</i> tidak cocok untuk kebutuhan <i>real-time IoT</i>	Arsitektur <i>edge</i> untuk pemrosesan lokal dan efisiensi	Klasifikasi arsitektur <i>edge</i> dengan SDN dan <i>machine learning</i>
22	(Villalonga dkk., 2020)	<i>Cloud-Based Industrial Cyber-Physical System for Data-Driven Reasoning: A Review and Use Case on an Industry 4.0 Pilot Line</i>	Tantangan <i>real-time</i> dan pengambilan keputusan ICPS	ICPS <i>cloud-to-edge</i> dengan Q-learning	Peningkatan pemantauan dan prediksi produksi di Industry 4.0
23	(Ferencz dkk., 2024)	<i>Cloud Integration of Industrial IoT Systems. Architecture, Security Aspects and Sample Implementations</i>	Tantangan integrasi, penyimpanan, dan keamanan data	Solusi <i>cloud</i> open-source untuk pengolahan dan keamanan	Infrastruktur <i>cloud</i> aman untuk sistem <i>IoT</i> industri yang <i>scalable</i>
24	(Arthurs dkk., 2022)	<i>A Taxonomy and Survey of Edge Cloud Computing for Intelligent Transportation Systems and Connected Vehicles</i>	<i>Cloud</i> tidak cocok untuk aplikasi kendaraan <i>real-time</i>	<i>Edge cloud</i> untuk pengelolaan lalu lintas dan kendaraan	Arsitektur MEC dan V2X untuk transportasi cerdas dan aman

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
25	(Bajic dkk., 2020)	<i>Real-time Data Analytics Edge Computing Application for Industry 4.0: The Mahalanobis-Taguchi Approach</i>	Pengolahan data besar lambat dalam manufaktur	Pendekatan Mahalanobis-Taguchi di <i>edge computing</i>	Analitik prediktif <i>real-time</i> untuk efisiensi manufaktur
26	(Loghin dkk., 2019)	<i>Towards Analyzing the Performance of Hybrid Edge-Cloud Processing</i>	Tuntutan komputasional yang tinggi dari analisis <i>big data</i> dan tantangan latensi terkait dalam komputasi awan untuk aplikasi waktu nyata.	Arsitektur <i>Hybrid Edge-Cloud</i> memungkinkan distribusi tugas pemrosesan data antara perangkat <i>edge</i> dan sistem awan untuk menyeimbangkan beban komputasional dan mengurangi latensi.	Makalah ini memberikan perbandingan baru arsitektur <i>Hybrid Edge-Cloud</i> untuk tugas <i>MapReduce</i> , meningkatkan latensi sekaligus mempertahankan skalabilitas, tidak seperti solusi tradisional khusus awan.
27	(Hendricks, 2021)	<i>Analyzing Web Site Performance between Edge Computing and Cloud Computing</i>	Masalah latensi dan skalabilitas untuk hosting web saat pemrosesan data terpusat di <i>cloud</i> , terutama untuk aplikasi yang sensitif terhadap waktu.	Makalah ini mengusulkan penggunaan <i>Edge Computing</i> untuk mengurangi latensi dengan memproses data lebih dekat ke pengguna dan membandingkannya dengan pendekatan <i>Cloud Computing</i> untuk menganalisis trade-off dalam hal latensi, penggunaan <i>CPU</i> , dan <i>RAM</i> .	Makalah ini berkontribusi dengan menunjukkan perbandingan kinerja dunia nyata antara infrastruktur <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> untuk kinerja situs web dengan tolok ukur yang eksplisit.
28	(Silva dkk., 2021)	<i>Investigating Edge vs Cloud Computing Trade-offs for Stream Processing</i>	Kompromi antara komputasi <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> dalam hal latensi dan skalabilitas untuk beban kerja pemrosesan aliran.	Studi ini mengusulkan analisis komparatif dari kedua model komputasi menggunakan aplikasi pemrosesan aliran di dunia nyata, dengan penekanan pada latensi jaringan, overhead komputasi, dan skalabilitas data.	Makalah ini membandingkan kinerja pemrosesan aliran di <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> , memberikan wawasan tentang arsitektur <i>edge-cloud</i> hibrida untuk aplikasi yang sensitif terhadap waktu seperti analisis data streaming.
29	(Mansouri dkk., 2021)	<i>Resource Utilization of Distributed Databases in Edge-Cloud Environment</i>	Pemanfaatan sumber daya yang tidak efisien dan penurunan kinerja saat menangani <i>database</i>	Makalah ini menyelidiki <i>database</i> terdistribusi (seperti MongoDB, Cassandra, dll.) di <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> , mengusulkan strategi	Studi ini memajukan kinerja <i>database</i> terdistribusi dengan menilai skalabilitas dan konsumsi sumber dayanya dalam

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
			terdistribusi di lingkungan <i>Edge-Cloud</i> .	untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya dan meningkatkan kinerja sistem dalam pengaturan <i>hybrid</i> .	pengaturan <i>Edge-Cloud</i> , mengidentifikasi area di mana solusi hibrida mengungguli <i>cloud</i> murni atau sistem khusus <i>edge</i> .
30	(Ali-Eldin dkk., 2021)	<i>The Hidden Cost of The Edge: A Performance Comparison of Edge and Cloud Latencies</i>	Latensi dan kendala sumber daya komputasi <i>Edge</i> dalam aplikasi sensitif latensi.	Makalah ini membandingkan kinerja <i>Edge</i> vs <i>Cloud</i> dalam hal latensi dan sumber daya komputasi untuk menunjukkan bahwa komputasi <i>Edge</i> dapat hemat biaya untuk aplikasi <i>real-time</i> tertentu, tetapi <i>Cloud</i> mungkin masih lebih disukai dalam skenario yang membutuhkan daya pemrosesan tinggi.	Menekankan analisis biaya-manfaat dan trade-off latensi untuk <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> , memberikan wawasan utama untuk memilih di antara kedua arsitektur berdasarkan kebutuhan aplikasi.
31	(Carpio dkk., 2020)	<i>Engineering and Experimentally Benchmarking a Container-based Edge Computing System</i>	Kesulitan dalam membandingkan sistem komputasi tepi dalam hal latensi, skalabilitas, dan penggunaan sumber daya komputasinya.	Makalah ini menyajikan pengaturan eksperimental menggunakan kontainer Docker pada perangkat <i>edge</i> untuk pengenalan gambar dan tolok ukur pemrosesan audio, memberikan evaluasi terperinci tentang kinerja sistem.	Komputasi Tepi berbasis kontainer dengan memberikan hasil perbandingan untuk tugas-tugas seperti pengenalan gambar dan decoding audio-ke-teks pada sistem <i>Raspberry Pi</i> .
32	(Das dkk., 2018)	<i>EdgeBench: Benchmarking Edge Computing Platforms</i>	Kurangnya alat perbandingan standar untuk membandingkan platform komputasi tepi dalam hal kinerja, latensi, dan pemanfaatan sumber daya.	Makalah ini memperkenalkan <i>EdgeBench</i> , kerangka kerja perbandingan komprehensif untuk mengukur kinerja berbagai platform <i>edge</i> (misalnya, <i>Raspberry Pi</i> , <i>AWS Greengrass</i> , <i>Azure IoT Edge</i>) untuk tugas pengenalan audio-ke-teks dan gambar.	Makalah ini menyumbangkan <i>EdgeBench</i> sebagai alat perbandingan untuk mengevaluasi platform komputasi tepi untuk tugas waktu nyata, menetapkan dasar untuk perbandingan kinerja dalam komputasi tepi.

No.	Peneliti / Tahun	Judul	Permasalahan	Solusi	SOTA (<i>State-of-the-Art</i>)
33	(Walani & Doorsamy, 2025)	<i>Edge vs. Cloud: Empirical Insights into Data-Driven Condition Monitoring</i>	Tuntutan komputasi yang tinggi dari pemantauan kondisi berbasis data dalam pengaturan industri, dengan tantangan dalam latensi dan pemanfaatan sumber daya untuk deteksi kesalahan.	Makalah ini membandingkan komputasi <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> dalam pemantauan kondisi berbasis data untuk motor industri. Ini mengusulkan penggunaan komputasi <i>Edge</i> untuk diagnosis kesalahan waktu nyata dan komputasi <i>Cloud</i> untuk analisis yang lebih kompleks dan penyimpanan jangka panjang.	Studi ini memperkenalkan perbandingan arsitektur <i>Edge</i> vs <i>Cloud</i> untuk pemantauan kondisi dalam sistem industri, menunjukkan keuntungan solusi hibrida dalam diagnosis kesalahan.
34	(Pamadi & Singh, 2025)	<i>Edge AI vs Cloud AI: A Comparative Study of Performance Latency and Scalability</i>	Latensi dan kendala sumber daya komputasi komputasi komputasi <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> saat digunakan untuk pemantauan kondisi berbasis data dalam sistem industri.	Mirip dengan makalah sebelumnya, penelitian ini berfokus pada komputasi <i>Edge</i> vs <i>Cloud</i> untuk pemantauan kondisi. Ini menyoroti kebutuhan akan komputasi <i>Edge</i> untuk pengumpulan data <i>real-time</i> dan deteksi kesalahan, dengan komputasi <i>Cloud</i> digunakan untuk analitik jangka panjang dan pelatihan model yang kompleks.	Makalah ini memperluas penelitian tentang <i>Edge</i> dan <i>Cloud</i> dengan mengevaluasi kinerja empirisnya dalam sistem <i>IoT</i> industri, mengusulkan solusi hibrida yang mengintegrasikan kedua paradigma untuk pemantauan optimal dan deteksi kesalahan.

Seiring berkembangnya Industri 4.0, perangkat *IoT* menghasilkan *Big Data* dalam jumlah besar, yang memerlukan pemrosesan, penyimpanan, dan analisis data yang efisien. Penelitian ini berfokus pada evaluasi arsitektur komputasi *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* untuk analisis *real-time* dan *predictive maintenance* dengan mempertimbangkan tiga parameter kinerja utama: daya komputasi, penyimpanan, dan latensi.

1. Landasan Teoritis dan Pendekatan yang Ada

Bajic dkk. membandingkan komputasi *Edge* dan *Cloud* untuk analisis *Big Data*, mengidentifikasi latensi, penyimpanan, dan daya komputasi sebagai faktor kinerja utama tetapi tidak memiliki validasi empiris dalam konteks manufaktur. Penelitian tersebut menjadi basis penelitian, dimana penelitian ini bertujuan untuk memberikan validasi empiris yang dimaksud.

2. Arsitektur *Hybrid* dan Skalabilitas Komputasi

- a) Silva et al. membandingkan *Edge* dan *Cloud* untuk pemrosesan aliran tetapi kurang fokus pada solusi *Hybrid* dalam pemeliharaan prediktif.
- b) Walani & Doorsamy secara empiris menunjukkan bahwa sistem *Hybrid* optimal untuk pemantauan kondisi tetapi tidak memberikan evaluasi kuantitatif dalam aplikasi manufaktur dunia nyata.

3. *Big Data*, *Machine Learning*, dan *Predictive Maintenance*

Machine Learning untuk *predictive maintenance* memerlukan pemrosesan data secara *real-time*. Gautam serta Küfner dkk. mengeksplorasi penggunaan *Edge* untuk pengumpulan data secara *real-time* dan *Cloud* untuk pelatihan model yang kompleks tetapi tidak menawarkan perbandingan empiris untuk kasus penggunaan khusus manufaktur.

4. Benchmarking Eksperimental dan Aplikasi Real-Time

Carpio dkk. dan Modupe dkk. menyediakan benchmarking untuk sistem *Edge* dalam tugas *real-time* seperti pengenalan gambar tetapi tidak memiliki perbandingan dengan sistem *Hybrid* untuk aplikasi manufaktur seperti pemeliharaan prediktif.

5. Solusi *Hybrid* untuk Latensi dan Daya Komputasi

Saeik dkk. dan Ferencz dkk. membahas pemindahan tugas ke *Edge* untuk mengurangi latensi dan mengoptimalkan daya komputasi. Sistem *hybrid* menawarkan pemrosesan dan analisis data secara *real-time*, tetapi evaluasi yang lebih kuantitatif diperlukan untuk skenario manufaktur.

Kesenjangan Penelitian dan Kontribusi:

Meskipun penelitian sebelumnya telah membandingkan komputasi *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* dalam hal latensi, daya komputasi, dan penyimpanan, tidak ada yang membandingkan ketiganya secara sekaligus sehingga tidak kelihatan keterkaitan antara parameter serta perbandingan empiris langsung dalam konteks analisis data manufaktur dan *predictive maintenance* masih kurang. Penelitian ini akan mengisi kesenjangan ini dengan menguji arsitektur *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* secara sistematis di tiga parameter kinerja, yang menyediakan strategi pemilihan arsitektur yang optimal untuk aplikasi Industri 4.0.

2.2.2 Matriks Penelitian

Tabel II.2. Matriks Penelitian

Penelitian	Arsitektur	Metrik Evaluasi	Studi Kasus	Eksperimental ?
<i>Edge computing vs. Cloud computing: Challenges and opportunities in industry 4.0</i> (Bajic dkk., 2019)	<i>Cloud, Edge</i>	Kekuatan komputasi, Penyimpanan, Latensi	-	Tidak
<i>Towards Analyzing the Performance of Hybrid Edge-Cloud Processing</i> (Loghin dkk., 2019)	<i>Cloud, Edge, Hybrid</i>	<i>Processing time, Bandwidth</i>	<i>MapReduce Applications</i>	Ya
<i>Edge vs. Cloud: Empirical Insights into Data-Driven Condition Monitoring</i> (Walani & Doorsamy, 2025)	<i>Cloud, Edge</i>	<i>F1 Score, Training time, Inference time, Train CPU usage, Train memory</i>	<i>Data Driven Condition Monitoring (DDCM)</i>	Ya
<i>Edge AI vs Cloud AI: A Comparative Study of Performance Latency and Scalability</i> (Pamadi & Singh, 2025)	<i>Cloud, Edge, Hybrid</i>	Latensi, Skalabilitas, Kekuatan Komputasi, Efisiensi energi, Distribusi sumber daya	<i>Healthcare, Autonomous vehicles, Smart cities</i>	Ya
<i>The Hidden cost of the Edge: A Performance Comparison of Edge and Cloud Latencies</i> (Ali-Eldin dkk., 2021)	<i>Hybrid</i>	Latensi	<i>DNN Image Classification</i>	Ya
<i>Comparative Analysis of Edge Computing and Cloud Computing for Latency Sensitive Applications</i> (Elizabeth, 2023)	<i>Cloud, Edge</i>	Latensi, Biaya, Efisiensi Energi	Sistem Pengawasan Video, <i>Augmented Reality (AR)</i> , <i>Autonomous Vehicles</i>	
Penelitian ini	<i>Cloud, Edge, Hybrid</i>	Kekuatan Komputasi, Penyimpanan, Latensi	<i>Predictive Maintenance</i>	Ya

Matriks penelitian ini membandingkan beberapa studi yang mengevaluasi arsitektur *Cloud*, *Edge*, dan *Hybrid*, dengan fokus pada performa, yaitu latensi, skalabilitas, dan daya komputasi dalam konteks analitik data. Beberapa studi

memberikan analisis teoritis tentang *Edge* dan *Cloud*, tetapi tidak menawarkan data eksperimen (Bajic dkk., 2019). Studi lainnya mencakup eksperimen, membandingkan arsitektur melalui metrik seperti waktu pemrosesan, *bandwidth*, dan skor F1, dalam aplikasi seperti MapReduce dan pemantauan kondisi. Studi ini memberikan hasil tentang trade-off antara latensi dan daya komputasi, tetapi tidak membahas parameter penyimpanan dan berbagai aplikasi analitik data dalam Industri 4.0 (Loghin dkk., 2019; Walani & Doorsamy, 2025).

Beberapa studi lain mengeksplorasi kekuatan sistem *Hybrid*, yang menunjukkan kemampuan *Hybrid* untuk menggabungkan latensi rendah *Edge* dan skalabilitas *Cloud* (Ali-Eldin dkk., 2021; Pamadi & Singh, 2025). Studi-studi ini, meskipun eksperimental, difokuskan pada aplikasi spesifik seperti kendaraan otonom dan klasifikasi citra DNN, dan tidak menyediakan perbandingan komprehensif di seluruh analisis data untuk Industri 4.0. Gap yang ditimbulkan diatasi oleh penelitian ini, yang secara langsung membandingkan arsitektur *Edge*, *Cloud*, dan *Hybrid* untuk analisis data di Industri 4.0, khususnya *predictive maintenance*.

Kesenjangan utama yang diisi oleh penelitian ini adalah evaluasi komprehensif dari ketiga arsitektur (*Edge*, *Cloud*, *Hybrid*) dalam analisis data di industri 4.0. Berfokus pada kekuatan komputasi, penyimpanan, dan latensi, dan mencakup wawasan teoritis dan eksperimental, studi ini diharapkan bisa memberikan hasil yang lebih lengkap tentang bagaimana arsitektur ini bekerja

dalam aplikasi Industri 4.0 di dunia nyata, yang menyoroti kekuatan dan keterbatasan yang tidak sepenuhnya dieksplorasi dalam studi sebelumnya.