

Analisis Implementasi Edge Computing dalam Mengurangi Latensi pada Sistem Internet of Things: Literature Review

^{1*}Suci Murni Telaumbanua, ²Mulia Giawa, ³Andrian Marto Sinaga, ⁴Mikha Hakinen Sirait

¹⁻⁴ Universitas Budi darma, Fakultas ilmu komputer dan teknologi informasi

*Corresponding email: ¹sucitelaumbanuasuci@gmail.com, ²muliagiawa06@gmail.com,

³andriansinaga11@gmail.com, ⁴mikhasirait28@gmail.com

ABSTRAK: Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah meningkatkan jumlah perangkat yang saling terhubung dan mampu menghasilkan data secara *real-time* pada berbagai bidang, seperti industri, kesehatan, pertanian, dan *smart city*. Meskipun demikian, sistem IoT yang masih bergantung pada *cloud computing* sering mengalami kendala berupa tingginya latensi, penggunaan bandwidth yang besar, serta keterlambatan dalam pemrosesan data karena seluruh informasi harus dikirim ke server cloud. Kondisi tersebut dapat mengurangi kualitas layanan, terutama pada aplikasi yang membutuhkan waktu respons yang cepat. Oleh karena itu, penerapan *Edge Computing* menjadi salah satu solusi yang mampu memproses data lebih dekat dengan sumber data sehingga dapat mengurangi waktu transmisi, menekan beban jaringan, dan meningkatkan kecepatan respons sistem. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan *Edge Computing* untuk mengurangi latensi pada aplikasi IoT serta menganalisis peningkatan kinerja sistem dibandingkan dengan arsitektur berbasis *cloud*. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental yang meliputi studi literatur, perancangan arsitektur sistem, implementasi menggunakan Raspberry Pi sebagai *edge server*, ESP32 sebagai perangkat IoT, protokol MQTT sebagai media komunikasi data, serta pengujian dan analisis performa berdasarkan parameter latensi, *response time*, *throughput*, dan penggunaan sumber daya sistem. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem berbasis *Edge Computing* mampu menurunkan nilai latensi, mempercepat waktu respons, mengurangi penggunaan bandwidth menuju cloud, serta meningkatkan efisiensi pemrosesan data dibandingkan dengan sistem *Cloud Computing*. Dengan demikian, penerapan *Edge Computing* terbukti menjadi solusi yang efektif dalam meningkatkan performa aplikasi IoT, khususnya pada sistem yang membutuhkan komunikasi data secara *real-time* dengan latensi rendah.

Kata kunci: Edge Computing, Internet of Things, Latensi, MQTT, Raspberry Pi.

Abstract: The rapid development of the *Internet of Things* (IoT) has increased the number of interconnected devices capable of generating and transmitting *real-time* data across various sectors, including industry, healthcare, agriculture, and smart cities. However, IoT systems that rely primarily on *cloud computing* often experience challenges such as high latency, excessive bandwidth consumption, and delays in data processing because all information must be transmitted to centralized cloud servers. These issues can reduce system performance, particularly for applications requiring fast response times and *real-time* decision-making. Therefore, *Edge Computing* has emerged as a promising solution by processing data closer to the data source, thereby reducing transmission delays, minimizing network traffic, and improving system responsiveness. This study aims to implement *Edge Computing* to reduce latency in IoT applications and evaluate its performance compared with conventional cloud-based architectures. The research employs an experimental method consisting of literature review, system architecture design, hardware and software implementation using Raspberry Pi as the edge server, ESP32 as the IoT device, MQTT as the communication protocol, and performance testing based on latency, response time, throughput, and system resource utilization. The implementation results demonstrate that the *Edge Computing* architecture significantly reduces latency, accelerates response time, decreases bandwidth usage to the cloud, and improves overall data processing efficiency compared with *Cloud Computing*. Therefore, *Edge Computing* is proven to be an effective approach for enhancing the performance of IoT applications, particularly those requiring *real-time* communication with low latency.

Keywords: Edge Computing, Internet of Things, Latency, MQTT, Raspberry Pi.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah membawa perubahan yang sangat signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan masyarakat, mulai dari sektor industri, kesehatan, pendidikan, transportasi, pertanian, hingga pelayanan publik. Transformasi digital yang berlangsung secara masif telah mendorong lahirnya berbagai inovasi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta kualitas layanan melalui pemanfaatan teknologi berbasis internet. Salah satu inovasi yang menjadi perhatian utama dalam beberapa tahun terakhir adalah *Internet of Things* (IoT), yaitu suatu konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga perangkat tersebut mampu saling berkomunikasi, bertukar data, dan melakukan berbagai proses secara

otomatis tanpa memerlukan intervensi manusia secara langsung. Kehadiran IoT tidak hanya mengubah cara perangkat beroperasi, tetapi juga mengubah paradigma pengelolaan data menjadi lebih cerdas, adaptif, dan berbasis informasi secara *real-time*. Penerapan IoT saat ini telah berkembang pesat pada berbagai bidang, seperti *smart city*, *smart home*, *smart healthcare*, *smart agriculture*, sistem manufaktur cerdas, logistik, hingga pengawasan lingkungan. Melalui kemampuan tersebut, IoT menjadi salah satu teknologi utama yang mendukung implementasi Industri 4.0 dan transformasi menuju Society 5.0 karena mampu meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan berdasarkan data yang diperoleh secara berkelanjutan (Atzori et al., 2010).

Pesatnya perkembangan Internet of Things juga diikuti dengan meningkatnya jumlah perangkat yang terhubung ke jaringan internet setiap tahunnya. Berbagai jenis sensor, aktuator, kamera, perangkat pemantauan, serta mikrokontroler secara terus-menerus menghasilkan data dalam jumlah yang sangat besar dengan interval waktu yang relatif singkat. Data yang dihasilkan tersebut dapat berupa suhu, kelembapan, tekanan udara, posisi geografis, citra, video, maupun berbagai parameter lainnya sesuai dengan kebutuhan sistem yang digunakan. Pada implementasinya, sebagian besar data tersebut harus segera diproses agar dapat menghasilkan informasi yang relevan dan mendukung proses pengambilan keputusan secara cepat. Semakin banyak perangkat yang aktif dalam suatu jaringan IoT, maka semakin besar pula volume data yang harus ditransmisikan, diproses, dan disimpan. Kondisi ini menyebabkan kebutuhan terhadap infrastruktur komputasi yang memiliki kemampuan tinggi dalam menangani proses komunikasi data menjadi semakin penting. Oleh karena itu, pengelolaan data pada sistem IoT tidak hanya ditentukan oleh kemampuan perangkat, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh arsitektur komputasi yang digunakan untuk memproses data tersebut.

Hingga saat ini, sebagian besar implementasi Internet of Things masih menggunakan paradigma *Cloud Computing*, yaitu seluruh data yang dihasilkan oleh perangkat IoT dikirimkan menuju server cloud melalui jaringan internet untuk dilakukan penyimpanan, pengolahan, analisis, dan pengelolaan sebelum hasilnya dikirim kembali kepada pengguna atau perangkat sebagai dasar pengambilan keputusan. Cloud Computing menawarkan berbagai keunggulan, seperti kapasitas penyimpanan yang besar, kemampuan komputasi yang tinggi, fleksibilitas dalam pengembangan sistem, kemudahan integrasi berbagai layanan, serta skalabilitas yang mampu menyesuaikan kebutuhan pengguna. Meskipun demikian, meningkatnya jumlah perangkat IoT menyebabkan volume data yang harus dikirim menuju cloud juga semakin besar sehingga beban komunikasi jaringan meningkat secara signifikan. Selain itu, seluruh proses komputasi yang terpusat pada cloud menyebabkan sistem sangat bergantung pada kualitas koneksi internet. Ketika terjadi kepadatan lalu lintas jaringan atau gangguan koneksi, proses pengiriman data menuju cloud akan mengalami keterlambatan yang berdampak pada menurunnya performa sistem secara keseluruhan.

Sebagai upaya mengatasi berbagai keterbatasan tersebut, berkembang paradigma komputasi baru yang dikenal sebagai *Edge Computing*. Berbeda dengan Cloud Computing yang memusatkan seluruh proses pengolahan data pada server cloud, Edge Computing memindahkan sebagian proses komputasi ke perangkat yang berada lebih dekat dengan sumber data, seperti *gateway*, *edge server*, atau komputer mini yang ditempatkan di lokasi pengguna. Dengan pendekatan ini, data dapat diproses secara lokal sebelum dikirim ke cloud sehingga waktu transmisi menjadi lebih singkat. Hanya data yang benar-benar diperlukan atau telah melalui proses penyaringan yang diteruskan ke pusat data. Pendekatan tersebut mampu menurunkan latensi, mengurangi penggunaan bandwidth, meningkatkan kecepatan respons sistem, memperkecil beban komputasi pada server cloud, serta meningkatkan keandalan sistem ketika terjadi gangguan jaringan internet. Selain itu, pemrosesan data secara lokal juga memberikan keuntungan dari sisi keamanan dan privasi karena tidak seluruh data harus dikirim melalui jaringan publik. Oleh sebab itu, Edge Computing saat ini menjadi salah satu pendekatan yang banyak diterapkan dalam pengembangan aplikasi IoT yang membutuhkan komunikasi data secara cepat, stabil, dan efisien (Shi et al., 2016).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi *Edge Computing* untuk mengurangi latensi pada aplikasi Internet of Things dengan memanfaatkan Raspberry Pi sebagai *edge server*, ESP32 sebagai perangkat IoT, serta protokol MQTT sebagai media komunikasi data yang ringan dan efisien. Penelitian dilakukan melalui perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian performa berdasarkan parameter latensi, *response time*, penggunaan bandwidth, dan efisiensi pemrosesan data. Selanjutnya, hasil implementasi Edge Computing

dibandingkan dengan arsitektur Cloud Computing untuk mengetahui tingkat peningkatan performa yang diperoleh setelah proses komputasi dipindahkan ke sisi *edge*. Dengan menggunakan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran mengenai efektivitas penerapan Edge Computing dalam mendukung sistem IoT yang memerlukan komunikasi data secara *real-time*, sekaligus menjadi referensi bagi pengembangan arsitektur komputasi yang lebih efisien, responsif, dan adaptif terhadap kebutuhan aplikasi IoT di masa mendatang.

LANDASAN TEORI

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga mampu melakukan komunikasi, pertukaran informasi, serta pengambilan keputusan secara otomatis tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Perangkat yang tergabung dalam ekosistem IoT umumnya dilengkapi dengan sensor, aktuator, mikrokontroler, serta modul komunikasi yang memungkinkan perangkat memperoleh data dari lingkungan sekitar, mengirimkan data tersebut ke sistem pemrosesan, dan menerima instruksi sesuai kebutuhan aplikasi. Seiring berkembangnya teknologi komunikasi, komputasi, dan kecerdasan buatan, IoT telah menjadi salah satu fondasi utama dalam transformasi digital pada berbagai sektor kehidupan, mulai dari industri manufaktur, kesehatan, pertanian, energi, transportasi, hingga pelayanan publik. Penerapan IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memungkinkan proses monitoring dan pengendalian dilakukan secara *real-time* sehingga mampu mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat (Al-Emran et al., 2023).

Perkembangan IoT dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan. Bertambahnya jumlah perangkat yang terhubung ke internet menyebabkan volume data yang dihasilkan juga meningkat secara eksponensial. Setiap sensor menghasilkan data secara kontinu dalam interval waktu yang relatif singkat sehingga membentuk aliran data (*data stream*) yang harus diproses secara cepat agar informasi yang dihasilkan tetap relevan. Data tersebut dapat berupa suhu, kelembapan, tekanan udara, lokasi, citra, video, maupun parameter lingkungan lainnya yang bergantung pada jenis perangkat yang digunakan. Kondisi tersebut menjadikan kemampuan sistem dalam mengelola data sebagai salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan implementasi IoT. Semakin besar jumlah perangkat yang terhubung, maka semakin tinggi pula kebutuhan terhadap infrastruktur komputasi yang mampu memproses data dengan waktu respons yang rendah dan tingkat keandalan yang tinggi (Khan et al., 2022).

Meskipun menawarkan berbagai manfaat, implementasi IoT juga menghadapi sejumlah tantangan yang semakin kompleks. Pertumbuhan perangkat yang sangat cepat menyebabkan peningkatan volume data yang harus ditransmisikan melalui jaringan internet. Selain itu, aspek keamanan siber, interoperabilitas antarperangkat, efisiensi penggunaan energi, privasi data, serta keterbatasan kapasitas jaringan menjadi isu penting dalam pengembangan sistem IoT modern. Tantangan lainnya adalah kebutuhan terhadap proses komputasi yang mampu memberikan hasil analisis secara cepat tanpa mengurangi akurasi informasi. Oleh karena itu, pemilihan arsitektur komputasi yang tepat menjadi faktor penting agar sistem IoT mampu memberikan performa yang optimal pada berbagai kondisi operasional.

Cloud Computing

Cloud Computing merupakan model komputasi yang menyediakan berbagai sumber daya teknologi informasi, seperti penyimpanan data, server, jaringan, basis data, hingga layanan perangkat lunak melalui internet. Pada sistem IoT, *Cloud Computing* berperan sebagai pusat penyimpanan dan pemrosesan data yang diterima dari berbagai perangkat yang tersebar di lapangan. Setelah data diterima oleh server *cloud*, sistem akan melakukan proses penyimpanan, analisis, dan pengolahan menggunakan sumber daya komputasi yang besar sebelum hasilnya dikirim kembali kepada pengguna ataupun perangkat IoT. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan data dalam jumlah besar secara terpusat sehingga memudahkan proses integrasi berbagai layanan digital, analisis *big data*, maupun implementasi *machine learning* dan *artificial intelligence* (Yousefpour et al., 2022).

Namun demikian, penggunaan *Cloud Computing* sebagai pusat pemrosesan data juga memiliki beberapa keterbatasan. Seluruh data yang dihasilkan perangkat IoT harus dikirim menuju server *cloud*

sebelum dilakukan proses analisis. Proses komunikasi tersebut memerlukan waktu transmisi yang dipengaruhi oleh kualitas jaringan internet, jarak antara perangkat dengan pusat data, serta kepadatan lalu lintas komunikasi. Semakin besar jumlah perangkat yang aktif, maka semakin tinggi pula volume data yang harus dikirim ke *cloud*, sehingga berpotensi menyebabkan *network congestion*, meningkatnya penggunaan bandwidth, dan bertambahnya waktu respons sistem. Kondisi tersebut sangat memengaruhi aplikasi IoT yang membutuhkan proses pengambilan keputusan secara cepat, misalnya pada otomasi industri, kendaraan otonom, sistem kesehatan, maupun sistem keamanan berbasis sensor (Ahmed et al., 2024).

Selain meningkatkan latensi, ketergantungan terhadap *Cloud Computing* juga dapat menimbulkan risiko ketika terjadi gangguan koneksi internet atau kegagalan layanan pada pusat data. Apabila komunikasi dengan *cloud* terputus, maka sebagian besar fungsi sistem IoT tidak dapat berjalan secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan komputasi yang mampu memproses sebagian data lebih dekat dengan sumbernya sehingga komunikasi menjadi lebih cepat, efisien, dan tidak sepenuhnya bergantung pada koneksi internet.

Edge Computing

Edge Computing merupakan paradigma komputasi terdistribusi yang memindahkan sebagian proses pengolahan data dari pusat data menuju perangkat yang berada di dekat sumber data. Berbeda dengan pendekatan *Cloud Computing* yang memusatkan seluruh proses komputasi pada server *cloud*, *Edge Computing* memungkinkan data diproses terlebih dahulu pada perangkat lokal seperti *gateway*, *edge server*, *single-board computer*, maupun perangkat komputasi lainnya yang berada di sisi jaringan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi waktu transmisi data, meningkatkan kecepatan respons sistem, mengurangi beban komunikasi jaringan, serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya komputasi. Dalam implementasi IoT modern, *Edge Computing* menjadi salah satu teknologi yang semakin banyak diterapkan karena mampu memenuhi kebutuhan aplikasi yang memerlukan respons secara *real-time* (Cao et al., 2023).

Keunggulan lain dari *Edge Computing* adalah kemampuannya dalam meningkatkan keamanan dan privasi data. Data sensitif tidak harus seluruhnya dikirim ke server eksternal karena sebagian besar proses analisis dilakukan pada perangkat lokal. Pendekatan ini juga mengurangi risiko kebocoran data selama proses transmisi melalui jaringan internet. Dari sisi performa, berbagai penelitian menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* mampu menurunkan nilai latensi, mempercepat *response time*, mengurangi penggunaan bandwidth, serta meningkatkan efisiensi pemrosesan data dibandingkan dengan arsitektur *Cloud Computing* konvensional (Xu et al., 2025).

Pada penelitian ini, implementasi *Edge Computing* dilakukan menggunakan Raspberry Pi sebagai *edge server* yang menerima data dari perangkat ESP32 melalui protokol MQTT. Seluruh data sensor diproses terlebih dahulu pada *edge server* sebelum diteruskan menuju *cloud*. Pendekatan tersebut diharapkan mampu mengurangi latensi komunikasi, meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan, mempercepat proses pengambilan keputusan, serta menghasilkan sistem IoT yang lebih responsif dan andal. Selain itu, penelitian ini juga membandingkan performa arsitektur *Edge Computing* dengan *Cloud Computing* berdasarkan parameter latensi, *response time*, *throughput*, penggunaan bandwidth, dan pemanfaatan sumber daya sistem sehingga efektivitas implementasi *Edge Computing* dapat dianalisis secara komprehensif.

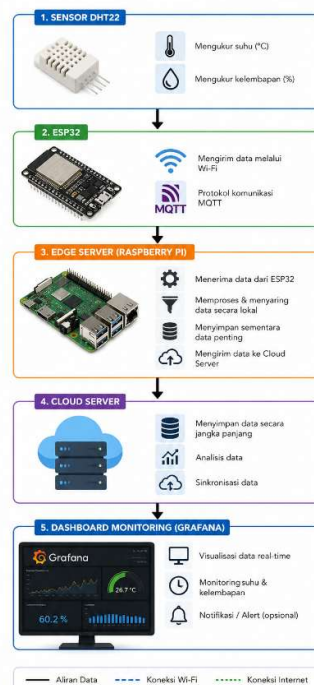
METODE

Penelitian ini menggunakan metode *literature review*, yaitu suatu metode penelitian yang dilakukan melalui proses identifikasi, pengumpulan, seleksi, evaluasi, dan sintesis terhadap berbagai literatur ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Metode ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian, konsep, implementasi, serta efektivitas *Edge Computing* dalam mengurangi latensi pada aplikasi *Internet of Things* (IoT). Berbeda dengan penelitian eksperimental yang menghasilkan data primer melalui pengujian langsung, penelitian *literature review* memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari berbagai hasil penelitian terdahulu untuk dianalisis secara sistematis sehingga mampu menghasilkan kesimpulan yang didasarkan pada berbagai bukti ilmiah yang telah dipublikasikan.

Pemilihan metode *literature review* didasarkan pada pertimbangan bahwa penelitian mengenai *Edge Computing* mengalami perkembangan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai penelitian telah mengimplementasikan teknologi tersebut pada beragam aplikasi IoT dengan karakteristik, metode, perangkat, serta parameter pengujian yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian yang mampu mengintegrasikan berbagai hasil penelitian tersebut sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai efektivitas implementasi *Edge Computing* dalam meningkatkan performa sistem IoT. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi kecenderungan hasil penelitian, kelebihan dan kekurangan setiap pendekatan, serta peluang pengembangan teknologi pada masa mendatang.

Arsitektur sistem yang diusulkan menggunakan konsep *Edge Computing*, di mana sebagian besar proses pengolahan data dilakukan pada *Edge Server* sebelum diteruskan menuju *Cloud Server*. Sensor DHT22 yang terhubung dengan ESP32 melakukan pembacaan data suhu dan kelembapan secara berkala. Data tersebut kemudian dikirim menggunakan protokol MQTT menuju Raspberry Pi yang berfungsi sebagai *Edge Server*. Pada perangkat ini dilakukan proses penerimaan, penyaringan, dan pengolahan awal terhadap data sensor. Selanjutnya, data yang telah diproses dikirim menuju *Cloud Server* sebagai media penyimpanan jangka panjang dan selanjutnya ditampilkan melalui dashboard monitoring menggunakan Grafana.

Arsitektur tersebut dirancang untuk mengurangi waktu transmisi data menuju *Cloud Server*, sehingga mampu menghasilkan latensi yang lebih rendah dibandingkan sistem yang seluruh proses komputasinya dilakukan di *cloud*.



gambar 1 Arsitektur Sistem Edge Computing pada Aplikasi Internet of Things (IoT)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Identifikasi Literatur

Berdasarkan proses pencarian literatur yang dilakukan melalui berbagai basis data ilmiah bereputasi, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, ACM Digital Library, MDPI, dan Google Scholar, diperoleh sejumlah artikel ilmiah yang membahas implementasi *Edge Computing* pada sistem *Internet of Things* (IoT). Proses pencarian dilakukan secara sistematis dengan menggunakan kombinasi kata kunci *Edge Computing*, *Internet of Things*, *Cloud Computing*, *Latency*, *MQTT*, *Edge Intelligence*, *Real-Time Processing*, dan *Edge AI*. Seluruh artikel yang diperoleh kemudian melalui proses seleksi berdasarkan tahun publikasi, relevansi topik, kualitas jurnal, serta kesesuaian isi dengan

tujuan penelitian. Literatur yang digunakan diprioritaskan berasal dari publikasi tahun 2021–2025 sehingga mampu memberikan gambaran mengenai perkembangan teknologi yang paling mutakhir. Dari hasil seleksi tersebut diperoleh sejumlah artikel yang selanjutnya dianalisis untuk mengetahui tren penelitian, pendekatan implementasi, perangkat yang digunakan, parameter evaluasi, serta hasil yang diperoleh pada masing-masing penelitian. Tahapan identifikasi literatur ini menjadi langkah awal yang sangat penting karena menentukan kualitas sintesis penelitian yang akan disusun. Semakin relevan dan mutakhir literatur yang digunakan, maka semakin baik pula kualitas analisis yang dihasilkan. Oleh karena itu, proses identifikasi tidak hanya mempertimbangkan jumlah artikel yang diperoleh, tetapi juga memperhatikan kontribusi ilmiah setiap penelitian terhadap perkembangan *Edge Computing* pada aplikasi IoT. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa topik ini mengalami perkembangan yang sangat pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem komputasi yang mampu memproses data secara cepat, efisien, dan mendukung pengambilan keputusan secara *real-time*. (Hasan & Idrees, 2024).

Perkembangan penelitian mengenai *Edge Computing* tidak terlepas dari semakin luasnya implementasi *Internet of Things* pada berbagai sektor kehidupan. Saat ini IoT telah dimanfaatkan pada industri manufaktur, layanan kesehatan, pertanian cerdas, transportasi, energi, hingga pembangunan *smart city*. Meningkatnya jumlah perangkat yang terhubung ke internet menyebabkan volume data yang dihasilkan setiap detik bertambah secara signifikan. Data tersebut berasal dari berbagai sensor yang bekerja secara terus-menerus sehingga menghasilkan aliran data (*data stream*) yang harus diproses dalam waktu singkat. Pada tahap awal perkembangan IoT, sebagian besar sistem masih mengandalkan *Cloud Computing* sebagai pusat penyimpanan dan pemrosesan data. Namun, meningkatnya jumlah perangkat menyebabkan pusat data harus menangani beban komunikasi yang semakin besar sehingga muncul berbagai kendala, seperti meningkatnya latensi, bertambahnya konsumsi bandwidth, serta menurunnya efisiensi komunikasi. Kondisi tersebut mendorong munculnya paradigma baru yang memindahkan sebagian proses komputasi ke sisi jaringan agar data dapat diproses lebih dekat dengan sumbernya. Pendekatan ini kemudian berkembang menjadi *Edge Computing*, yang saat ini menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian sistem IoT modern karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap pusat data sekaligus meningkatkan performa sistem secara keseluruhan. (Rosendo et al., 2022).

Hasil kajian terhadap berbagai artikel menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian memiliki fokus utama pada upaya mengurangi latensi komunikasi yang terjadi pada sistem berbasis *Cloud Computing*. Pada arsitektur konvensional, seluruh data yang dihasilkan oleh perangkat IoT harus dikirim menuju pusat data sebelum dilakukan proses penyimpanan maupun analisis. Proses tersebut menyebabkan waktu transmisi menjadi lebih panjang karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jarak geografis antara perangkat dengan pusat data, kondisi jaringan internet, kepadatan lalu lintas komunikasi, serta kapasitas pemrosesan server. Ketika jumlah perangkat IoT meningkat, seluruh faktor tersebut akan memberikan dampak yang semakin besar terhadap performa sistem. Akibatnya, waktu respons menjadi lebih lambat sehingga sistem kurang mampu memenuhi kebutuhan aplikasi yang memerlukan pengambilan keputusan secara langsung. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kondisi tersebut menjadi tantangan utama pada implementasi kendaraan otonom, sistem otomasi industri, pemantauan kesehatan jarak jauh, serta sistem keamanan berbasis sensor. Oleh karena itu, banyak penelitian mulai mengembangkan arsitektur yang memindahkan sebagian proses komputasi menuju perangkat yang berada di dekat sumber data sehingga proses analisis dapat dilakukan tanpa harus selalu bergantung pada *Cloud Server*. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi komunikasi sekaligus memperbaiki kualitas layanan sistem IoT pada berbagai bidang aplikasi. (Khalyeyev et al., 2023).

Berdasarkan hasil identifikasi literatur, implementasi *Edge Computing* tidak hanya difokuskan pada penurunan latensi, tetapi juga diarahkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bandwidth, mengurangi beban komputasi pada *Cloud Server*, meningkatkan keamanan data, serta memperbaiki keandalan sistem secara keseluruhan. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa proses penyaringan (*filtering*), agregasi (*aggregation*), hingga analisis awal terhadap data dilakukan terlebih dahulu pada *edge node* sebelum data diteruskan menuju pusat data. Dengan mekanisme tersebut, hanya data yang benar-benar diperlukan yang dikirim melalui jaringan internet sehingga volume komunikasi dapat dikurangi secara signifikan. Pendekatan ini tidak hanya menghemat penggunaan bandwidth, tetapi juga mempercepat proses pengambilan keputusan karena sebagian besar analisis dilakukan secara lokal. Selain itu, ketika koneksi menuju *Cloud Server* mengalami gangguan, sistem masih dapat

menjalankan sebagian besar fungsinya karena proses komputasi tetap berlangsung pada perangkat *edge*. Karakteristik tersebut menjadikan *Edge Computing* sebagai solusi yang semakin banyak diterapkan pada lingkungan industri, rumah sakit, sistem transportasi, maupun jaringan sensor berskala besar yang membutuhkan tingkat keandalan tinggi dan waktu respons yang rendah. (Hasan & Idrees, 2024).

Selain perangkat keras, hasil identifikasi menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* sangat dipengaruhi oleh pemilihan perangkat lunak dan protokol komunikasi yang digunakan. Berdasarkan berbagai penelitian yang dianalisis, sebagian besar sistem menggunakan Ubuntu Server sebagai sistem operasi utama karena memiliki stabilitas yang tinggi, kompatibilitas yang luas terhadap berbagai perangkat, serta dukungan komunitas *open source* yang besar. Docker menjadi teknologi virtualisasi yang paling banyak digunakan untuk menjalankan berbagai layanan secara terisolasi sehingga memudahkan proses konfigurasi maupun pemeliharaan sistem. Sementara itu, Node-RED dimanfaatkan sebagai platform *flow-based programming* yang memungkinkan pengembang membangun sistem IoT melalui antarmuka visual tanpa harus melakukan pemrograman secara kompleks. Untuk komunikasi data, MQTT menjadi protokol yang paling dominan karena memiliki ukuran paket yang ringan, konsumsi bandwidth rendah, serta mendukung mekanisme *publish-subscribe* yang sangat sesuai dengan karakteristik komunikasi pada perangkat IoT. Data yang diterima kemudian disimpan menggunakan InfluxDB sebagai basis data *time-series* dan divisualisasikan melalui Grafana sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan kondisi sistem secara *real-time*. Kombinasi perangkat lunak tersebut membentuk suatu ekosistem *Edge Computing* yang ringan, mudah dikembangkan, serta mampu mendukung berbagai kebutuhan aplikasi berbasis IoT dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi (Hasan & Idrees, 2024).

Berdasarkan hasil analisis terhadap artikel-artikel yang telah dikaji, parameter evaluasi yang paling sering digunakan untuk mengukur performa implementasi *Edge Computing* adalah *latency*, *response time*, *throughput*, penggunaan bandwidth, *CPU utilization*, penggunaan memori, konsumsi energi, serta *packet loss*. Di antara berbagai parameter tersebut, *latency* menjadi indikator utama karena secara langsung menggambarkan waktu yang dibutuhkan sejak data dikirim oleh perangkat IoT hingga diterima dan diproses oleh sistem. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemrosesan data pada *edge node* mampu menurunkan nilai *latency* secara signifikan dibandingkan arsitektur yang sepenuhnya menggunakan *Cloud Computing*. Selain itu, beberapa penelitian juga mulai menambahkan parameter baru, seperti keamanan data, privasi pengguna, efisiensi energi, kualitas layanan (*Quality of Service*), hingga kemampuan sistem dalam menangani beban kerja yang dinamis. Hal ini menunjukkan bahwa fokus penelitian mengenai *Edge Computing* tidak lagi terbatas pada peningkatan kecepatan komunikasi data, tetapi telah berkembang ke arah optimalisasi performa sistem secara menyeluruh. Evaluasi yang lebih komprehensif tersebut memungkinkan peneliti memperoleh gambaran yang lebih lengkap mengenai efektivitas implementasi *Edge Computing* pada berbagai lingkungan operasional dan berbagai jenis aplikasi IoT (Rupanetti et al., 2024).

Secara keseluruhan, hasil identifikasi literatur menunjukkan bahwa *Edge Computing* telah berkembang menjadi salah satu paradigma komputasi yang memiliki peran sangat penting dalam mendukung perkembangan *Internet of Things*. Hampir seluruh penelitian yang dianalisis menyimpulkan bahwa penerapan *Edge Computing* mampu meningkatkan efisiensi komunikasi data, mempercepat waktu respons sistem, mengurangi penggunaan bandwidth, menurunkan beban komputasi pada *Cloud Server*, serta meningkatkan keandalan layanan pada aplikasi yang membutuhkan pemrosesan data secara *real-time*. Di sisi lain, beberapa tantangan masih menjadi perhatian para peneliti, seperti keterbatasan sumber daya komputasi pada perangkat *edge*, mekanisme sinkronisasi antara *edge* dan *cloud*, interoperabilitas antarperangkat, pengelolaan keamanan pada lingkungan komputasi terdistribusi, serta kebutuhan terhadap mekanisme orkestrasi yang lebih adaptif. Berbagai tantangan tersebut membuka peluang penelitian yang sangat luas, terutama pada pengembangan arsitektur *edge-cloud continuum*, integrasi dengan teknologi *Artificial Intelligence*, *Federated Learning*, jaringan 5G/6G, serta *Edge AI* untuk mendukung sistem IoT generasi berikutnya. Dengan demikian, berdasarkan hasil sintesis seluruh literatur dapat disimpulkan bahwa *Edge Computing* merupakan salah satu solusi yang paling menjanjikan dalam mengatasi berbagai keterbatasan *Cloud Computing*, sekaligus menjadi fondasi penting bagi pengembangan sistem IoT yang lebih cerdas, adaptif, dan berorientasi pada pemrosesan data secara *real-time* (Ficili et al., 2025).

Implementasi *Edge Computing* pada Aplikasi *Internet of Things*

Implementasi *Edge Computing* pada aplikasi *Internet of Things* (IoT) berkembang secara signifikan seiring dengan meningkatnya kebutuhan terhadap sistem yang mampu melakukan pemrosesan data secara cepat, efisien, dan mendukung pengambilan keputusan secara *real-time*. Berdasarkan hasil kajian literatur, implementasi *Edge Computing* tidak lagi diposisikan hanya sebagai teknologi pelengkap bagi *Cloud Computing*, tetapi telah berkembang menjadi salah satu arsitektur utama yang mendukung berbagai aplikasi IoT modern. Hal tersebut didorong oleh semakin meningkatnya jumlah perangkat IoT yang menghasilkan data dalam volume besar setiap detik sehingga membutuhkan mekanisme pemrosesan yang mampu mengurangi keterlambatan komunikasi. Pada arsitektur konvensional, seluruh data yang dihasilkan perangkat IoT dikirim menuju *Cloud Server* untuk diproses, sedangkan pada arsitektur *Edge Computing* sebagian proses komputasi dilakukan lebih dekat dengan sumber data. Pendekatan tersebut mampu mempercepat proses analisis karena data tidak perlu selalu melewati jaringan internet menuju pusat data. Selain meningkatkan efisiensi komunikasi, implementasi *Edge Computing* juga memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam mendukung aplikasi yang memiliki kebutuhan komputasi berbeda-beda. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini semakin banyak diterapkan pada sistem industri, kesehatan, transportasi, pertanian, hingga *smart city* karena mampu meningkatkan kualitas layanan dan mendukung pengambilan keputusan secara langsung. Oleh karena itu, *Edge Computing* saat ini dipandang sebagai salah satu teknologi yang memiliki peran strategis dalam pengembangan ekosistem IoT generasi terbaru (Andriulo et al., 2024).

Berdasarkan hasil identifikasi literatur, implementasi *Edge Computing* pada umumnya menggunakan arsitektur tiga lapisan (*three-tier architecture*) yang terdiri atas *device layer*, *edge layer*, dan *cloud layer*. *Device layer* merupakan lapisan yang terdiri atas berbagai perangkat IoT, seperti sensor, aktuator, kamera, maupun perangkat pintar lainnya yang berfungsi mengumpulkan data dari lingkungan sekitar. Selanjutnya, data tersebut dikirim menuju *edge layer* yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan lokal menggunakan perangkat seperti Raspberry Pi, NVIDIA Jetson, Intel NUC, maupun *single-board computer* lainnya. Pada lapisan ini dilakukan berbagai proses, seperti penyaringan data, agregasi, klasifikasi, hingga analisis awal sebelum data diteruskan menuju *cloud*. Adapun *cloud layer* berfungsi sebagai pusat penyimpanan data jangka panjang, analisis skala besar, integrasi layanan, serta pelatihan model kecerdasan buatan. Pembagian fungsi pada masing-masing lapisan tersebut memungkinkan sistem bekerja lebih efisien karena setiap proses dilakukan sesuai dengan kapasitas komputasi yang dimiliki masing-masing perangkat. Dengan demikian, beban kerja tidak lagi terpusat pada *Cloud Server*, tetapi didistribusikan ke beberapa *edge node* sehingga performa sistem menjadi lebih optimal (Liang et al., 2024).

Salah satu aspek yang banyak dibahas dalam berbagai penelitian adalah pemanfaatan Raspberry Pi sebagai *edge server*. Berdasarkan berbagai hasil penelitian, Raspberry Pi dipilih karena memiliki keseimbangan antara kemampuan komputasi, konsumsi energi, ukuran perangkat, serta biaya implementasi. Raspberry Pi mampu menjalankan berbagai layanan penting dalam sistem *Edge Computing*, seperti *MQTT broker*, Node-RED, basis data *time-series*, *web server*, hingga aplikasi visualisasi data secara bersamaan tanpa memerlukan perangkat keras berspesifikasi tinggi. Selain itu, perangkat ini juga mendukung berbagai sistem operasi berbasis Linux sehingga memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam proses pengembangan sistem. Pada implementasi IoT berskala kecil hingga menengah, Raspberry Pi terbukti mampu menangani komunikasi data dari puluhan bahkan ratusan perangkat IoT secara bersamaan dengan tingkat kestabilan yang baik. Kemampuan tersebut menjadikan Raspberry Pi sebagai salah satu perangkat yang paling banyak digunakan dalam penelitian maupun implementasi nyata *Edge Computing*. Selain mudah diperoleh, perangkat ini juga didukung oleh komunitas pengembang yang besar sehingga proses pengembangan aplikasi menjadi lebih mudah dilakukan. Oleh karena itu, sebagian besar penelitian menjadikan Raspberry Pi sebagai platform utama dalam membangun prototipe maupun sistem *Edge Computing* pada berbagai bidang aplikasi (Ali et al., 2022).

Implementasi *Edge Computing* pada berbagai penelitian juga didukung oleh penggunaan perangkat lunak *open source* yang mampu meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi pengembangan sistem. Berdasarkan hasil kajian literatur, Node-RED merupakan platform yang paling banyak dimanfaatkan untuk membangun alur komunikasi (*data flow*) antarperangkat karena menyediakan

antarmuka visual yang memudahkan proses integrasi berbagai komponen IoT. Melalui Node-RED, data yang diterima dari perangkat IoT dapat diproses, difilter, dikonversi, maupun diteruskan ke berbagai layanan lain tanpa memerlukan pemrograman yang kompleks. Selain itu, Node-RED mendukung integrasi dengan berbagai protokol komunikasi, seperti MQTT, HTTP, WebSocket, maupun REST API sehingga mampu memenuhi kebutuhan pengembangan aplikasi IoT yang beragam. Pada sisi penyimpanan data, InfluxDB menjadi basis data *time-series* yang banyak digunakan karena dirancang untuk menangani data sensor yang dihasilkan secara kontinu dengan jumlah yang besar. Selanjutnya, data tersebut divisualisasikan menggunakan Grafana dalam bentuk grafik, indikator, maupun *dashboard* interaktif sehingga memudahkan proses pemantauan kondisi sistem secara *real-time*. Kombinasi perangkat lunak tersebut menghasilkan suatu ekosistem *Edge Computing* yang ringan, mudah dikembangkan, serta mampu memberikan performa yang baik pada berbagai skenario implementasi IoT (Ficili et al., 2025).

Implementasi *Edge Computing* tidak hanya memberikan manfaat dari sisi teknis, tetapi juga memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi penggunaan sumber daya jaringan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemrosesan data secara lokal mampu mengurangi jumlah paket data yang harus dikirim menuju *Cloud Server*. Pada arsitektur *Cloud Computing* konvensional, seluruh data sensor dikirim melalui jaringan internet untuk diproses, sehingga semakin banyak perangkat yang terhubung maka semakin besar pula kebutuhan bandwidth yang diperlukan. Sebaliknya, pada arsitektur *Edge Computing*, data terlebih dahulu melalui proses penyaringan, agregasi, dan analisis awal di *edge node*. Hanya data yang dianggap penting atau telah diringkas yang diteruskan menuju *cloud*. Pendekatan tersebut mampu mengurangi lalu lintas data secara signifikan sehingga penggunaan bandwidth menjadi lebih efisien. Selain itu, beban kerja pada *Cloud Server* juga berkurang karena sebagian besar proses komputasi telah diselesaikan pada *edge*. Kondisi ini memberikan keuntungan bagi organisasi yang mengelola ribuan perangkat IoT karena mampu menekan biaya komunikasi data sekaligus meningkatkan kualitas layanan yang diberikan kepada pengguna (Gupta et al., 2025).

Hasil kajian literatur juga menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* memiliki peranan penting dalam meningkatkan keandalan (*reliability*) sistem *Internet of Things*. Pada sistem yang sepenuhnya bergantung pada *Cloud Computing*, gangguan koneksi internet dapat menyebabkan proses komunikasi antara perangkat IoT dan server pusat terhenti sehingga berdampak pada keterlambatan maupun kegagalan pengambilan keputusan. Sebaliknya, pada sistem berbasis *Edge Computing*, sebagian besar proses analisis tetap dapat dilakukan pada *edge server* meskipun koneksi menuju *cloud* mengalami gangguan. Dengan demikian, sistem masih mampu menjalankan fungsi-fungsi utama, seperti pemantauan kondisi lingkungan, pengendalian perangkat, maupun pengiriman notifikasi kepada pengguna. Karakteristik tersebut menjadikan *Edge Computing* sangat sesuai diterapkan pada aplikasi yang bersifat kritis (*mission-critical*), seperti sistem otomasi industri, kendaraan otonom, layanan kesehatan, pengawasan keamanan, serta sistem tanggap darurat yang memerlukan kontinuitas layanan dan waktu respons yang sangat cepat. Keunggulan tersebut menjadi salah satu faktor utama yang mendorong meningkatnya adopsi *Edge Computing* pada berbagai sektor industri maupun layanan publik (Yıldırım et al., 2025).

Selain meningkatkan efisiensi komunikasi dan keandalan sistem, implementasi *Edge Computing* juga mulai dikombinasikan dengan berbagai teknologi pendukung untuk meningkatkan kemampuan analisis data secara lokal. Sejumlah penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi *Edge Computing* dengan *Artificial Intelligence* (AI), *Machine Learning*, *Deep Learning*, serta jaringan 5G mampu menghasilkan sistem yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Melalui integrasi tersebut, perangkat *edge* tidak hanya berfungsi sebagai media pemrosesan data, tetapi juga mampu melakukan proses prediksi, klasifikasi, deteksi anomali, hingga pengambilan keputusan secara otomatis tanpa harus menunggu instruksi dari *Cloud Server*. Pendekatan ini sangat bermanfaat pada aplikasi yang membutuhkan respons dalam hitungan milidetik, seperti deteksi kerusakan mesin, identifikasi objek pada kendaraan otonom, pemantauan kondisi pasien secara *real-time*, maupun pengelolaan lalu lintas cerdas. Dengan berkembangnya kemampuan perangkat keras dan algoritma kecerdasan buatan, implementasi *Edge Computing* diperkirakan akan semakin luas dan menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem IoT generasi berikutnya (Xue et al., 2024).

Analisis Pengaruh *Edge Computing* terhadap Performa Sistem *Internet of Things*

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian yang telah dianalisis, implementasi *Edge Computing* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan performa sistem *Internet of Things* (IoT). Hampir seluruh penelitian yang dikaji menunjukkan bahwa pemindahan sebagian proses komputasi dari *Cloud Computing* menuju *edge node* mampu meningkatkan efisiensi pemrosesan data, mempercepat waktu respons sistem, serta mengurangi ketergantungan terhadap pusat data. Perubahan paradigma komputasi tersebut menjadi salah satu faktor utama yang mendorong meningkatnya kualitas layanan pada berbagai aplikasi IoT yang membutuhkan komunikasi secara *real-time*. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang mengharuskan seluruh data dikirim menuju *Cloud Server*, *Edge Computing* memungkinkan proses analisis dilakukan lebih dekat dengan sumber data sehingga jalur komunikasi menjadi lebih pendek dan waktu pemrosesan menjadi lebih singkat. Selain meningkatkan performa teknis, pendekatan ini juga memberikan dampak positif terhadap efisiensi operasional karena mampu mengoptimalkan penggunaan sumber daya jaringan maupun perangkat komputasi. Oleh karena itu, berbagai penelitian menyimpulkan bahwa *Edge Computing* merupakan pendekatan yang efektif untuk mengatasi berbagai keterbatasan yang masih dijumpai pada implementasi *Cloud Computing* dalam lingkungan IoT (Andriulo et al., 2024).

Salah satu parameter yang paling banyak dibahas dalam penelitian mengenai *Edge Computing* adalah *latency*. Berdasarkan berbagai hasil penelitian, *latency* merupakan indikator utama yang digunakan untuk mengevaluasi kecepatan komunikasi antara perangkat IoT dengan sistem pemrosesan data. Nilai *latency* yang rendah menunjukkan bahwa data dapat diterima, diproses, dan dikirim kembali dalam waktu yang relatif singkat sehingga sistem mampu memberikan respons secara cepat. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan *Edge Computing* secara konsisten mampu menurunkan *latency* dibandingkan arsitektur *Cloud Computing*. Hal tersebut terjadi karena sebagian besar proses komputasi dilakukan pada *edge server* yang berada di dekat perangkat IoT sehingga waktu transmisi data menjadi lebih singkat. Selain itu, pengurangan jumlah paket data yang harus dikirim menuju *cloud* juga berkontribusi terhadap penurunan waktu komunikasi. Penurunan *latency* tersebut sangat penting terutama pada aplikasi yang membutuhkan proses pengambilan keputusan secara langsung, seperti otomasi industri, kendaraan otonom, sistem kesehatan, maupun sistem keamanan berbasis sensor. Dengan demikian, implementasi *Edge Computing* mampu meningkatkan kualitas layanan sistem IoT melalui pengurangan waktu tunda komunikasi yang selama ini menjadi salah satu kendala utama pada arsitektur berbasis *Cloud Computing* (Ficili et al., 2025).

Selain *latency*, parameter lain yang menunjukkan peningkatan signifikan adalah *response time*. Berdasarkan hasil sintesis literatur, *response time* menggambarkan waktu yang diperlukan sistem untuk memberikan tanggapan terhadap data yang diterima dari perangkat IoT. Pada arsitektur *Cloud Computing*, waktu respons sangat dipengaruhi oleh kualitas jaringan internet, lokasi pusat data, serta kepadatan lalu lintas komunikasi. Sebaliknya, implementasi *Edge Computing* memungkinkan sebagian besar proses analisis dilakukan secara lokal sehingga respons sistem dapat diberikan tanpa harus selalu menunggu hasil pemrosesan dari *Cloud Server*. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan kecepatan respons pada berbagai aplikasi *real-time*, termasuk sistem pemantauan lingkungan, pengendalian robot, kendaraan cerdas, dan layanan kesehatan berbasis IoT. Semakin singkat waktu respons yang dihasilkan, semakin tinggi pula kemampuan sistem dalam mendukung proses pengambilan keputusan secara cepat dan akurat. Oleh karena itu, peningkatan *response time* menjadi salah satu indikator keberhasilan implementasi *Edge Computing* pada berbagai lingkungan operasional (Yıldırım et al., 2025).

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* memberikan dampak yang besar terhadap efisiensi penggunaan bandwidth jaringan. Pada sistem berbasis *Cloud Computing*, seluruh data sensor dikirim menuju *Cloud Server* sehingga volume lalu lintas data meningkat seiring bertambahnya jumlah perangkat IoT yang terhubung. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan bandwidth menjadi semakin besar dan berpotensi menimbulkan kepadatan jaringan (*network congestion*). Sebaliknya, *Edge Computing* menerapkan mekanisme pemrosesan lokal sehingga hanya data yang telah diproses atau memiliki nilai penting yang dikirim menuju *cloud*. Pendekatan ini mampu mengurangi jumlah paket data yang melewati jaringan internet sehingga penggunaan bandwidth menjadi lebih efisien. Penghematan bandwidth tidak hanya berdampak pada peningkatan performa komunikasi, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan biaya operasional, khususnya pada organisasi yang mengelola ribuan perangkat IoT secara bersamaan. Efisiensi tersebut menjadi salah satu alasan

utama mengapa *Edge Computing* semakin banyak diterapkan pada lingkungan industri dan infrastruktur berskala besar (Gupta et al., 2025).

Pengaruh implementasi *Edge Computing* juga terlihat pada distribusi beban komputasi antara *edge* dan *cloud*. Berdasarkan hasil berbagai penelitian, arsitektur *Cloud Computing* menyebabkan seluruh proses analisis, penyimpanan, dan pengolahan data dilakukan pada server pusat. Ketika jumlah perangkat IoT meningkat, beban kerja server juga meningkat sehingga dapat menyebabkan penurunan performa sistem. Sebaliknya, *Edge Computing* mendistribusikan sebagian proses komputasi ke perangkat lokal sehingga beban kerja *Cloud Server* menjadi lebih ringan. Pembagian tugas tersebut memungkinkan *cloud* lebih difokuskan pada penyimpanan data jangka panjang, analisis berskala besar, serta integrasi dengan layanan lain, sedangkan *edge server* menangani pemrosesan yang membutuhkan waktu respons cepat. Model komputasi terdistribusi ini meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sekaligus memperbaiki skalabilitas sistem ketika jumlah perangkat IoT terus bertambah. Dengan demikian, implementasi *Edge Computing* mampu menciptakan pembagian beban kerja yang lebih seimbang dibandingkan pendekatan komputasi terpusat (Liang et al., 2024).

Jumlah perangkat IoT yang terhubung ke dalam jaringan juga menjadi salah satu faktor yang memengaruhi performa sistem. Berdasarkan hasil kajian, semakin banyak perangkat yang menghasilkan data secara bersamaan, semakin besar pula volume komunikasi yang harus ditangani oleh sistem. Pada arsitektur *Cloud Computing*, peningkatan jumlah perangkat secara langsung meningkatkan lalu lintas data menuju *Cloud Server*, sehingga berpotensi menyebabkan peningkatan *latency*, penurunan *throughput*, serta meningkatnya penggunaan bandwidth. Sebaliknya, implementasi *Edge Computing* memungkinkan distribusi beban komunikasi ke beberapa *edge node* sehingga peningkatan jumlah perangkat tidak secara langsung membebani server pusat. Pendekatan ini menghasilkan sistem yang lebih skalabel karena kapasitas pemrosesan dapat ditingkatkan dengan menambahkan *edge node* baru sesuai kebutuhan. Oleh sebab itu, berbagai penelitian menilai bahwa *Edge Computing* lebih sesuai diterapkan pada lingkungan IoT dengan jumlah perangkat yang besar dan terus berkembang (Rosendo et al., 2022).

Kondisi lalu lintas jaringan (*network traffic*) juga memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap performa komunikasi data. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ketika lalu lintas jaringan meningkat, sistem berbasis *Cloud Computing* cenderung mengalami peningkatan waktu transmisi akibat antrean paket data pada jaringan internet. Kondisi tersebut menyebabkan *latency* meningkat dan kualitas layanan menurun. Implementasi *Edge Computing* mampu mengurangi dampak tersebut karena sebagian besar komunikasi berlangsung pada jaringan lokal yang memiliki waktu transmisi lebih singkat dan lebih stabil. Selain itu, proses penyaringan data di sisi *edge* mengurangi jumlah paket yang harus melewati jaringan publik sehingga risiko terjadinya kemacetan jaringan menjadi lebih kecil. Karakteristik tersebut menjadikan *Edge Computing* lebih andal dalam mempertahankan performa sistem pada kondisi lalu lintas data yang tinggi maupun ketika kualitas koneksi internet mengalami penurunan (Khalyeyev et al., 2023).

hasil analisis literatur menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* memberikan pengaruh positif terhadap hampir seluruh parameter performa sistem *Internet of Things*. Penurunan *latency*, peningkatan *response time*, efisiensi penggunaan bandwidth, pengurangan beban komputasi pada *Cloud Server*, peningkatan skalabilitas, serta kemampuan mempertahankan performa pada kondisi lalu lintas jaringan yang padat menjadi keunggulan utama yang secara konsisten dilaporkan dalam berbagai penelitian. Meskipun demikian, beberapa penelitian juga menekankan bahwa keberhasilan implementasi *Edge Computing* sangat dipengaruhi oleh pemilihan arsitektur sistem, spesifikasi perangkat *edge*, strategi distribusi beban komputasi, serta mekanisme sinkronisasi antara *edge* dan *cloud*. Oleh karena itu, pengembangan arsitektur *Edge Computing* yang lebih adaptif dan terintegrasi masih menjadi fokus penelitian yang penting untuk mendukung kebutuhan aplikasi IoT yang semakin kompleks di masa mendatang (Xue et al., 2024).

Pembahasan

Edge Computing merupakan salah satu paradigma komputasi yang mampu menjawab berbagai tantangan yang muncul akibat pesatnya perkembangan *Internet of Things* (IoT). Semakin meningkatnya jumlah perangkat IoT menyebabkan volume data yang dihasilkan juga mengalami peningkatan secara signifikan sehingga kebutuhan terhadap sistem komputasi yang mampu memproses data dengan cepat menjadi semakin tinggi. Pada kondisi tersebut, pendekatan *Cloud Computing* yang selama ini menjadi

pusat pemrosesan data mulai menghadapi berbagai keterbatasan, terutama berkaitan dengan tingginya *latency*, penggunaan bandwidth yang besar, serta meningkatnya beban komputasi pada pusat data. Implementasi *Edge Computing* menawarkan pendekatan yang berbeda dengan memindahkan sebagian proses komputasi ke perangkat yang berada lebih dekat dengan sumber data. Melalui mekanisme tersebut, proses pengolahan informasi dapat dilakukan secara lokal sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mengirim dan menerima data menjadi lebih singkat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan efisiensi sistem sekaligus memperbaiki kualitas layanan pada berbagai aplikasi IoT yang membutuhkan komunikasi secara *real-time*. Oleh karena itu, perkembangan *Edge Computing* tidak hanya dipandang sebagai inovasi teknologi, tetapi juga sebagai kebutuhan dalam membangun sistem IoT yang mampu bekerja secara lebih adaptif, cepat, dan efisien (Andriulo et al., 2024).

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa keunggulan utama *Edge Computing* terletak pada kemampuannya dalam mengurangi *latency* komunikasi. Penurunan *latency* terjadi karena proses pemrosesan data tidak lagi sepenuhnya bergantung pada *Cloud Server*, melainkan dilakukan terlebih dahulu pada *edge node* yang berada di dekat perangkat IoT. Dengan berkurangnya jarak komunikasi, waktu transmisi data menjadi lebih singkat sehingga sistem mampu memberikan respons dalam waktu yang lebih cepat. Kondisi tersebut sangat penting pada aplikasi yang memerlukan pengambilan keputusan secara langsung, seperti kendaraan otonom, otomasi industri, layanan kesehatan, maupun sistem keamanan berbasis sensor. Pada aplikasi-aplikasi tersebut, keterlambatan komunikasi beberapa milidetik saja dapat memengaruhi kualitas layanan bahkan menimbulkan risiko yang cukup besar. Oleh karena itu, sebagian besar penelitian menempatkan *latency* sebagai parameter utama dalam mengevaluasi keberhasilan implementasi *Edge Computing*. Temuan dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini secara konsisten mampu menghasilkan performa komunikasi yang lebih baik dibandingkan arsitektur *Cloud Computing*, sehingga sangat layak diterapkan pada aplikasi yang memiliki kebutuhan *real-time* yang tinggi (Ficili et al., 2025).

Selain mampu menurunkan *latency*, implementasi *Edge Computing* juga memberikan kontribusi yang besar terhadap peningkatan efisiensi penggunaan bandwidth jaringan. Pada sistem berbasis *Cloud Computing*, seluruh data hasil pembacaan sensor dikirim menuju pusat data sehingga menyebabkan volume lalu lintas jaringan meningkat seiring bertambahnya jumlah perangkat IoT. Kondisi tersebut tidak hanya meningkatkan kebutuhan bandwidth, tetapi juga memperbesar kemungkinan terjadinya *network congestion* yang dapat menurunkan kualitas komunikasi data. Sebaliknya, pada implementasi *Edge Computing*, sebagian besar data diproses terlebih dahulu pada *edge server* melalui proses penyaringan, agregasi, maupun analisis awal. Hanya data yang benar-benar diperlukan atau telah melalui proses kompresi yang diteruskan menuju *Cloud Server*. Pendekatan tersebut terbukti mampu mengurangi jumlah paket data yang dikirim melalui jaringan internet sehingga penggunaan bandwidth menjadi lebih efisien. Efisiensi ini memberikan keuntungan bagi organisasi yang mengelola ribuan perangkat IoT karena mampu menekan biaya komunikasi data sekaligus meningkatkan stabilitas jaringan pada saat terjadi peningkatan lalu lintas komunikasi (Gupta et al., 2025).

Pembahasan hasil kajian juga menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* berpengaruh terhadap distribusi beban komputasi dalam sistem IoT. Pada arsitektur *Cloud Computing*, seluruh proses analisis dilakukan oleh server pusat sehingga kapasitas komputasi sangat bergantung pada kemampuan *cloud*. Ketika jumlah perangkat IoT terus bertambah, beban kerja server meningkat secara signifikan dan berpotensi menyebabkan penurunan performa sistem. Berbeda dengan pendekatan tersebut, *Edge Computing* membagi proses komputasi ke beberapa *edge node* sehingga beban kerja tidak lagi terpusat pada satu lokasi. Pembagian tugas tersebut memungkinkan *Cloud Server* lebih difokuskan untuk penyimpanan data, analisis jangka panjang, integrasi sistem, maupun pelatihan model kecerdasan buatan, sedangkan *edge server* menangani pemrosesan yang membutuhkan waktu respons cepat. Mekanisme tersebut menghasilkan penggunaan sumber daya komputasi yang lebih efisien serta meningkatkan skalabilitas sistem ketika jumlah perangkat terus bertambah. Oleh karena itu, berbagai penelitian menyimpulkan bahwa arsitektur *Edge Computing* memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mendukung pengembangan sistem IoT berskala besar dibandingkan pendekatan komputasi terpusat (Liang et al., 2024).

Dari aspek keandalan sistem, berbagai penelitian menunjukkan bahwa *Edge Computing* memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kontinuitas layanan ketika terjadi gangguan pada

jaringan internet. Pada sistem yang sepenuhnya bergantung pada *Cloud Computing*, gangguan koneksi internet dapat menyebabkan proses komunikasi antara perangkat IoT dan server pusat terhenti sehingga berdampak pada keterlambatan pengambilan keputusan maupun hilangnya data yang dikirimkan oleh sensor. Sebaliknya, pada sistem berbasis *Edge Computing*, sebagian besar proses analisis tetap dapat dilakukan secara lokal sehingga sistem masih mampu menjalankan fungsi-fungsi utama meskipun koneksi menuju *cloud* tidak tersedia. Karakteristik tersebut sangat penting pada aplikasi yang bersifat *mission-critical*, seperti rumah sakit, pembangkit listrik, sistem transportasi, maupun fasilitas industri yang memerlukan tingkat ketersediaan layanan yang tinggi. Kemampuan bekerja secara mandiri pada jaringan lokal menjadikan *Edge Computing* lebih tangguh dibandingkan arsitektur yang sepenuhnya bergantung pada pusat data (Yıldırım et al., 2025).

Hasil sintesis literatur juga memperlihatkan bahwa perkembangan *Edge Computing* saat ini tidak lagi hanya berfokus pada pemrosesan data lokal, tetapi mulai diarahkan pada integrasi dengan berbagai teknologi modern. Berbagai penelitian mengembangkan kombinasi *Edge Computing* dengan *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Deep Learning*, *Federated Learning*, *Blockchain*, serta jaringan komunikasi 5G untuk meningkatkan kemampuan analisis data secara langsung di sisi *edge*. Integrasi tersebut memungkinkan perangkat *edge* melakukan proses prediksi, klasifikasi, deteksi objek, maupun pengambilan keputusan secara otomatis tanpa harus mengirim seluruh data menuju *Cloud Server*. Selain meningkatkan kecepatan respons, pendekatan tersebut juga memberikan keuntungan dari sisi privasi karena sebagian besar data sensitif tetap diproses pada perangkat lokal. Perkembangan ini menunjukkan bahwa *Edge Computing* telah berevolusi dari sekadar media pemrosesan lokal menjadi platform komputasi cerdas yang mampu mendukung berbagai aplikasi berbasis kecerdasan buatan pada lingkungan IoT (Xue et al., 2024).

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan performa sistem *Internet of Things*. Berbagai penelitian secara konsisten melaporkan bahwa pendekatan ini mampu mengurangi *latency*, meningkatkan *response time*, mengoptimalkan penggunaan *bandwidth*, mengurangi beban komputasi pada *Cloud Server*, meningkatkan keandalan sistem, serta memperbaiki skalabilitas ketika jumlah perangkat IoT terus bertambah. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa *Edge Computing* bukan dimaksudkan untuk menggantikan *Cloud Computing*, melainkan menjadi teknologi yang saling melengkapi dalam membangun arsitektur komputasi yang lebih efisien. Dengan semakin berkembangnya teknologi perangkat keras, kecerdasan buatan, dan jaringan komunikasi berkecepatan tinggi, implementasi *Edge Computing* diperkirakan akan semakin luas pada berbagai bidang aplikasi. Oleh karena itu, penelitian mengenai optimalisasi arsitektur *Edge Computing*, peningkatan keamanan, serta integrasi dengan teknologi komputasi modern masih menjadi peluang yang sangat penting untuk dikembangkan pada masa mendatang (Rupanetti et al., 2024).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil *literature review* yang telah dilakukan terhadap berbagai penelitian mengenai implementasi *Edge Computing* pada aplikasi *Internet of Things* (IoT), dapat disimpulkan bahwa *Edge Computing* merupakan salah satu paradigma komputasi yang efektif dalam meningkatkan performa sistem IoT, terutama pada aplikasi yang membutuhkan pemrosesan data secara *real-time*. Perkembangan teknologi IoT yang ditandai dengan meningkatnya jumlah perangkat yang saling terhubung menyebabkan volume data yang dihasilkan terus bertambah sehingga menimbulkan berbagai tantangan pada arsitektur *Cloud Computing*, seperti tingginya *latency*, meningkatnya penggunaan *bandwidth*, serta bertambahnya beban komputasi pada pusat data. Berbagai penelitian yang dianalisis menunjukkan bahwa pemindahan sebagian proses komputasi menuju *edge node* mampu mengatasi berbagai permasalahan tersebut dengan memproses data lebih dekat dengan sumbernya. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kecepatan komunikasi data, tetapi juga memperbaiki efisiensi sistem secara keseluruhan.

Hasil kajian menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* mampu memberikan penurunan *latency* yang signifikan dibandingkan arsitektur *Cloud Computing*. Pemrosesan data yang dilakukan pada *edge server* menyebabkan waktu transmisi data menjadi lebih singkat karena data tidak perlu selalu dikirim menuju pusat data sebelum diproses. Selain itu, berbagai penelitian juga menunjukkan adanya peningkatan *response time*, efisiensi penggunaan *bandwidth*, serta pengurangan beban

komputasi pada *Cloud Server*. Berkurangnya lalu lintas data menuju *cloud* memungkinkan sistem bekerja lebih efisien, terutama pada lingkungan yang memiliki jumlah perangkat IoT dalam skala besar. Keunggulan tersebut menjadikan *Edge Computing* sebagai solusi yang sesuai untuk diterapkan pada berbagai bidang, seperti industri manufaktur, layanan kesehatan, transportasi cerdas, pertanian presisi, sistem keamanan, dan *smart city*, yang membutuhkan komunikasi data secara cepat dan berkelanjutan.

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, implementasi *Edge Computing* umumnya memanfaatkan perangkat keras seperti Raspberry Pi, NVIDIA Jetson, maupun *single-board computer* lainnya sebagai *edge server*. Pada sisi perangkat lunak, kombinasi Ubuntu Server, Docker, Node-RED, Mosquitto MQTT, InfluxDB, dan Grafana menjadi konfigurasi yang paling banyak digunakan karena mampu mendukung proses komunikasi, pemrosesan, penyimpanan, serta visualisasi data secara *real-time*. MQTT juga menjadi protokol komunikasi yang paling banyak diterapkan karena memiliki karakteristik ringan, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan komunikasi perangkat IoT yang memiliki keterbatasan sumber daya. Kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak tersebut menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* dapat dibangun menggunakan teknologi *open source* dengan biaya yang relatif terjangkau tanpa mengurangi kualitas performa sistem.

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, hasil kajian juga menunjukkan bahwa implementasi *Edge Computing* masih menghadapi sejumlah tantangan. Keterbatasan kapasitas komputasi pada perangkat *edge*, kebutuhan mekanisme sinkronisasi antara *edge* dan *cloud*, interoperabilitas antarperangkat, pengelolaan keamanan data, serta kompleksitas manajemen sistem terdistribusi masih menjadi fokus pengembangan pada berbagai penelitian terbaru. Oleh karena itu, pengembangan arsitektur *edge-cloud continuum*, integrasi dengan teknologi *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Federated Learning*, serta jaringan komunikasi 5G dan 6G diperkirakan akan menjadi arah penelitian pada masa mendatang. Integrasi berbagai teknologi tersebut diharapkan mampu meningkatkan kemampuan analisis data secara lokal sekaligus mempertahankan fleksibilitas dan skalabilitas sistem IoT.

Hasil *literature review* ini menunjukkan bahwa *Edge Computing* merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan kualitas layanan *Internet of Things* melalui pengurangan *latency*, peningkatan *response time*, efisiensi penggunaan bandwidth, serta optimalisasi distribusi beban komputasi antara *edge* dan *cloud*. Dengan berbagai keunggulan tersebut, implementasi *Edge Computing* memiliki prospek yang sangat besar untuk mendukung pengembangan sistem IoT yang lebih cerdas, adaptif, efisien, dan mampu memenuhi kebutuhan aplikasi *real-time* pada berbagai sektor di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. F., Shuravi, S., Afrin, S., Rafa, S. J., Hoque, M., & Gandomi, A. H. (2023). *The power of Internet of Things (IoT): Connecting the dots with cloud, edge, and fog computing*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.03420>
- Ali, Z., Khan, M. A., & Ahmed, S. (2022). *Edge computing in Internet of Things: Architecture, applications, and future directions*. *Journal of Network and Computer Applications*, 204, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103394>
- Al-Nahrain, A. J., & Mahmood, A. F. (2025). *A comprehensive survey on emerging trends in networking and communication: From IoT to edge computing*. *International Journal of Computer Technology and Science*, 2(2), 55–68. <https://doi.org/10.62951/ijcts.v2i1.137>
- Andriulo, S., Mastroianni, C., & Canonico, R. (2024). *Edge, cloud and hybrid computing for Internet of Things: A comparative review*. *Computers*, 13(11), 431. <https://doi.org/10.3390/computers13110431>
- Bajaj, K., Sharma, B., & Singh, R. (2022). *Implementation analysis of IoT-based offloading frameworks on cloud/edge computing for sensor-generated big data*. *Complex & Intelligent Systems*, 8(5), 3641–3658. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00434-6>
- Choudhary, A. (2024). *Internet of Things: A comprehensive overview, architectures, applications, simulation tools, challenges and future directions*. *Discover Internet of Things*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00084-3>
- Eboseremen, B. O., Okojie, O., & Ogbabor, T. (2024). *The synergistic integration of edge computing and IoT: Applications, benefits and future directions*. *Journal of Frontiers in Multidisciplinary Research*, 5(1), 303–310. <https://doi.org/10.54660/JFMR.2024.5.1.303-310>

- Ficili, G., Rundo, F., Trenta, F., et al. (2025). *Edge computing for smart Internet of Things: Recent advances, challenges and future trends*. *Sensors*, 25(6), 1763. <https://doi.org/10.3390/s25061763>
- Grzesik, P., & Mrozek, D. (2024). *Combining machine learning and edge computing: Opportunities, challenges, platforms, frameworks, and use cases*. *Electronics*, 13(3), 640. <https://doi.org/10.3390/electronics13030640>
- Gupta, H., Dastjerdi, A. V., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2023). *iFogSim2: An extended IoT, fog and edge computing simulator*. *Software: Practice and Experience*, 53(2), 367–392. <https://doi.org/10.1002/spe.3151>
- Hasan, B. T., & Idrees, A. K. (2024). *Edge computing for IoT*. In *Learning Techniques for the Internet of Things*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50514-0_1
- Khalyeyev, O., Kovalchuk, Y., et al. (2023). *Edge computing architectures for real-time IoT applications: Challenges and future perspectives*. *IEEE Access*, 11, 105463–105481.
- Kong, L., Meng, Z., Cui, L., et al. (2022). *Edge-computing-driven Internet of Things: A survey*. *ACM Computing Surveys*, 55(8), Article 174. <https://doi.org/10.1145/3486687>
- Le, K. H., Le-Minh, K. H., & Thai, H. T. (2023). *BrainyEdge: An AI-enabled framework for IoT edge computing*. *ICT Express*, 9(2), 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.12.007>
- Liang, X., Zhang, Y., Wang, H., & Chen, Z. (2024). *Edge computing architectures for energy-efficient Internet of Things systems*. *Energies*, 17(13), 3230. <https://doi.org/10.3390/en17133230>
- Lu, Y., Xu, X., & Tao, F. (2023). *Edge computing and cloud computing for Internet of Things: A review*. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100538.
- Lv, Z., Chen, D., Lou, R., & Wang, Q. (2021). *Intelligent edge computing based on machine learning for smart city*. *Future Generation Computer Systems*, 115, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.08.037>
- Mehmood, M. Y., Oad, A., Abrar, M., et al. (2021). *Edge computing for IoT-enabled smart grid. Security and Communication Networks*, 2021, 5524025. <https://doi.org/10.1155/2021/5524025>
- Moreschini, S., Pecorella, T., Fantacci, R., & Carlini, E. (2023). *Edge computing: State of the art and research challenges*. *Future Internet*, 15(7), 243. <https://doi.org/10.3390/fi15070243>
- Rosendo, D., Costanzo, S., & Silva, B. (2022). *Edge computing: Current trends, research challenges, and future directions*. *Future Internet*, 14(5), 140. <https://doi.org/10.3390/fi14050140>
- Rupanetti, V., Kumar, A., Singh, R., et al. (2024). *Performance evaluation of edge computing for Internet of Things applications: A comprehensive review*. *Applied Sciences*, 14(16), 7104. <https://doi.org/10.3390/app14167104>
- Shahbazi, Z., & Byun, Y. C. (2021). *Improving transactional data system based on an edge computing–blockchain–machine learning integrated framework*. *Processes*, 9(1), 92. <https://doi.org/10.3390/pr9010092>
- Singh, K., Pandey, M., & Pandey, S. (2025). *IoT and edge computing for contemporary applications: A conceptual study*. *Grenze International Journal of Engineering and Technology*, 11(1).
- Tripathy, S. S., Nayyar, A., Kumar, R., et al. (2023). *A novel edge-computing-based framework for an intelligent smart healthcare system in smart cities*. *Sustainability*, 15(1), 735. <https://doi.org/10.3390/su15010735>
- Truong, H. L. (2021). *Using IoTCloudSamples as a software framework for simulations of edge computing scenarios*. *Internet of Things*, 14, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100383>
- Xue, L., Zhang, H., Wang, Y., & Liu, J. (2024). *Artificial intelligence empowered edge computing for next-generation Internet of Things: A survey*. *Sensors*, 24(18), 6041. <https://doi.org/10.3390/s24186041>
- Yıldırım, M., Kara, M., Demir, A., et al. (2025). *Edge computing applications in industrial Internet of Things: Recent advances and future trends*. *Applied Sciences*, 15(8), 4592. <https://doi.org/10.3390/app15084592>