

Arsitektur *Edge–Cloud* Berbasis AI untuk Optimalisasi Internet of Things Hemat Energi pada Smart City

Muhammad Zulfariansyah¹⁾, Gubtha Mahendra Putra²⁾, Muhammad Fawaz¹⁾, Imam Muhammad Hakim³⁾,

¹⁾ Sistem Informasi, Universitas Mulawarman

²⁾ Informatika, Universitas Mulawarman

³⁾ Teknik Elektro, Universitas Mulawarman

E-mail: zulfariansyah@unmul.ac.id

ABSTRAK

Konsep Smart City berbasis Internet of Things (IoT) telah banyak diterapkan di kawasan perkotaan dengan dukungan infrastruktur listrik dan jaringan yang memadai. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah *Sensor-Cloud*, yang memadukan sensor, IoT, dan komputasi awan untuk menjamin ketersediaan data waktu nyata di ekosistem kota modern. Namun, pendekatan ini sulit diadaptasi pada kawasan hutan tropis yang memiliki keterbatasan energi listrik, akses jaringan, serta biaya operasional tinggi. Tantangan ini menuntut rancangan arsitektur alternatif yang lebih hemat energi dan sesuai dengan kondisi lapangan. Penelitian ini bertujuan merumuskan sebuah arsitektur konseptual *Edge–Cloud* berbasis AI (*AI-driven*) yang mendukung implementasi Green IoT di kawasan hutan tropis. Mikrokontroler pada smart sensor *node* dilengkapi algoritma AI ringan (TinyML) untuk melakukan pre-processing berupa filtrasi, deteksi anomali, dan kompresi data. Data yang telah diproses kemudian dikirim ke *Edge* server untuk agregasi dan analisis awal, sebelum diteruskan ke pusat data (*Cloud*). Sistem ini ditenagai oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sederhana sebagai sumber energi terbarukan untuk menjaga keberlanjutan operasional. Hasil konseptual menunjukkan bahwa arsitektur ini berpotensi menekan konsumsi energi transmisi, mengurangi beban bandwidth, dan meningkatkan kecepatan respon sistem terhadap peristiwa penting seperti kebakaran hutan atau intrusi. Simpulan dari penelitian ini adalah bahwa kombinasi *Edge–Cloud*, AI, dan energi surya dapat menjadi solusi strategis untuk mendukung implementasi Smart City yang berkelanjutan di kawasan hutan tropis.

Kata Kunci: Smart City, *Edge Computing*, AI, Green IoT, TinyML, Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Hutan Tropis

ABSTRACT

The Smart City concept based on the Internet of Things (IoT) has been widely applied in urban areas with sufficient electricity and network infrastructure. One of the developed approaches is the Sensor-Cloud, which integrates sensors, IoT, and Cloud computing to ensure the availability of real-time data in modern urban ecosystems. However, this approach is difficult to adapt in tropical forest areas due to limited electricity, network access, and high operational costs. These challenges demand an alternative architecture that is more energy-efficient and suitable for remote environments. This study aims to formulate a conceptual AI-driven Edge–Cloud architecture to support the implementation of Green IoT in tropical forest regions. Microcontrollers in smart sensor nodes are equipped with lightweight AI algorithms (TinyML) to perform pre-processing such as filtering, anomaly detection, and data compression. The processed data is then sent to the Edge server for aggregation and initial analysis before being forwarded to the central Cloud. The system is powered by a simple Solar Power Plant (PLTS) as a renewable energy source to ensure sustainable operation. The conceptual results indicate that this architecture has the potential to reduce transmission energy consumption, lower bandwidth requirements, and improve system responsiveness to critical events such as forest fires or intrusions. The conclusion of this study is that the integration of Edge–Cloud, artificial intelligence, and solar energy can serve as a strategic solution to support sustainable Smart City implementation in tropical forest areas.

Keyword: Smart City, *Edge Computing*, Artificial Intelligence, Green IoT, TinyML, Solar Power, Tropical Forest

1. Pendahuluan

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah membawa dampak signifikan dalam transformasi kota menjadi Smart City, terutama melalui pengumpulan data real-time untuk pengelolaan lingkungan, transportasi, keamanan, dan layanan publik lainnya. Arsitektur Sensor–*Cloud*, yang bergantung pada pengiriman data mentah ke pusat *Cloud* untuk pemrosesan, menjadi pendekatan populer di wilayah perkotaan dengan infrastruktur listrik dan jaringan yang memadai. Penelitian yang dilakukan oleh Murwantara, (2022) menghasilkan sebuah pendekatan arsitektur antara *Cloud Computing*, IoT dan Data *Acquisition*. Namun, pendekatan ini menimbulkan konsumsi energi tinggi akibat transmisi data kontinu, kebutuhan bandwidth besar, serta latensi signifikan ketika koneksi tidak stabil (Chun et al., 2011; Rudenko et al., 1998; Hunt & Scott, 1999; Kumar & Lu, 2010; Kosta et al., 2012).

Kelemahan arsitektur *Cloud-only* menjadi semakin jelas ketika diterapkan di daerah terpencil seperti kawasan hutan tropis, di mana ketersediaan listrik dan jaringan telekomunikasi sering terbatas. Meskipun beberapa penelitian tentang Green IoT dan *Edge computing* menunjukkan bahwa pemrosesan data lebih dekat ke sumber (*Edge*) dapat mengurangi beban transmisi dan konsumsi energi (Chun et al. 2011), sebagian besar studi tersebut berfokus pada konteks perkotaan dan industri. Dengan demikian, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) dalam penerapan konsep AI-driven *Edge–Cloud* untuk sistem pemantauan dan pengelolaan sumber daya di kawasan non-urban yang berdaya terbatas seperti hutan tropis (Etaati, 2024).

Selain itu, sebagian besar model Smart City yang ada mengasumsikan infrastruktur energi dan konektivitas yang stabil, sehingga belum mempertimbangkan strategi optimasi daya, mitigasi latensi, dan komunikasi alternatif untuk daerah dengan sumber daya terbatas. Padahal, kawasan hutan tropis memiliki urgensi tinggi untuk dimonitor secara cerdas karena merupakan wilayah biodiversitas yang juga rentan terhadap kebakaran, intrusi manusia, dan degradasi lingkungan. Terlebih saat ini terdapat peningkatan kebutuhan terhadap aktivitas pemantauan tersebut, seiring dengan berkembangnya kapasitas teknologi yang memungkinkan pemantauan dilakukan. (Misiukas et al., 2021).

Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan arsitektur AI-driven *Edge–Cloud for Green IoT* yang dirancang khusus untuk mendukung implementasi Smart City di kawasan hutan tropis. Arsitektur ini mengintegrasikan algoritma kecerdasan buatan ringan (TinyML) pada mikrokontroler untuk melakukan *pre-processing* data secara lokal, sehingga hanya data relevan yang dikirim ke pusat. Energi sistem disuplai oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sederhana guna menjamin keberlanjutan operasi, sedangkan notifikasi kritis dikirim melalui SMS *Gateway* sebagai mitigasi terhadap gangguan konektivitas *Cloud*. Optimalisasi dilakukan melalui pengurangan beban transmisi data, penurunan latensi, dan peningkatan efisiensi energi di setiap lapisan sistem. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model arsitektur Smart City yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan di kawasan dengan keterbatasan sumber daya.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur dan analisis konseptual. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian bukan untuk menguji hipotesis kuantitatif, melainkan merumuskan model arsitektur konseptual yang sesuai dengan konteks Smart City di kawasan hutan tropis. Pendekatan kualitatif dianggap tepat karena memungkinkan peneliti untuk mengintegrasikan hasil-hasil penelitian terdahulu dengan kondisi nyata di lapangan yang ditandai oleh keterbatasan energi, infrastruktur, dan jaringan komunikasi (Cresswell, 2014).

A. Jenis Metode

1. Studi Literatur

Digunakan untuk mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis hasil-hasil penelitian sebelumnya mengenai Sensor–*Cloud*, *Edge Computing*, Green IoT, AI ringan (TinyML), serta penggunaan sumber energi terbarukan seperti PLTS.

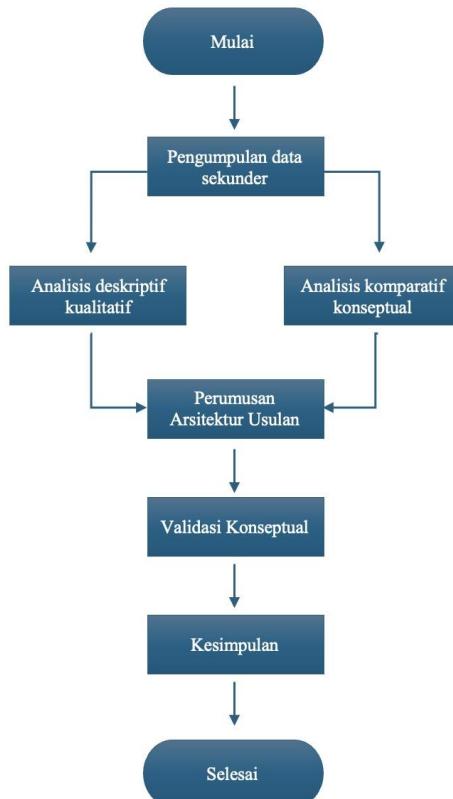
2. Analisis Konseptual

Digunakan untuk menyintesis hasil studi literatur dan merumuskan kerangka arsitektur usulan AI-driven *Edge–Cloud for Green IoT* yang adaptif terhadap keterbatasan energi dan konektivitas di hutan tropis.

B. Alur Penelitian

Alur penelitian ini disusun secara sistematis agar setiap tahap memiliki hubungan logis antara masalah, teori, dan solusi konseptual yang dihasilkan.

1. Identifikasi Permasalahan : menganalisis tantangan implementasi *Smart City* di kawasan hutan tropis (keterbatasan listrik, jaringan, dan energi).
2. Studi Literatur : mengkaji 20 jurnal nasional dan internasional yang relevan untuk menemukan pola dan gap penelitian.
3. Analisis Deskriptif Kualitatif : menguraikan hasil literatur guna menemukan pola dan hubungan antar konsep (*Green IoT, Edge Computing, TinyML*).
4. Analisis Komparatif Konseptual : membandingkan pendekatan *Cloud-only (Sensor–Cloud)* dengan *Edge–Cloud* dalam hal efisiensi energi, latensi, dan keandalan sistem.
5. Perumusan Arsitektur Usulan : menyusun rancangan konseptual arsitektur *AI-driven Edge–Cloud* dengan integrasi PLTS dan *SMS Gateway*.
6. Validasi Konseptual : dilakukan melalui *cross-check* dan *logical consistency check* dengan hasil penelitian terdahulu untuk memastikan kesesuaian prinsip desain dan rasionalitas teknis.



Gambar 1. Alur Metode Penelitian – Tahapan Studi Literatur hingga Perumusan Arsitektur Usulan

C. Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat sekunder, diperoleh dari:

1. Jurnal dan prosiding internasional bereputasi (2014–2025) yang membahas Smart City, Smart Forest, *Edge Computing*, *Green IoT*, *Energy Efficiency*, dan *AI on Edge*.
2. Dokumen teknis dan studi kasus terkait implementasi sistem monitoring hutan dan kota cerdas di Indonesia dan negara tropis lainnya.
3. Laporan teknis nasional, seperti pedoman pengelolaan energi terbarukan dan data topografi wilayah tropis (sebagai konteks implementasi).

D. Validasi dan Pengujian Metode

Validasi penelitian konseptual dilakukan melalui justifikasi teoretis dan konsistensi argumen, sebagaimana disyaratkan oleh karakteristik teori yang baik menurut Gregor (2006, pp. 6–7, 28).

E. Lokasi dan Konteks Penelitian

Meskipun penelitian ini bersifat konseptual, konteks penerapannya difokuskan pada kawasan hutan tropis di Kalimantan Timur, Indonesia, sebagai representasi wilayah dengan karakteristik:

- Akses listrik terbatas,
- Konektivitas jaringan tidak stabil,
- Potensi pemanfaatan energi surya tinggi,
- Kebutuhan *monitoring* lingkungan berkelanjutan (misalnya deteksi kebakaran, kualitas air, dan intrusi manusia).

Pemilihan konteks ini dilakukan agar rancangan arsitektur memiliki relevansi implementatif terhadap kondisi riil di lapangan, terutama dalam mendukung *Green Smart City* dan transformasi digital sektor kehutanan.

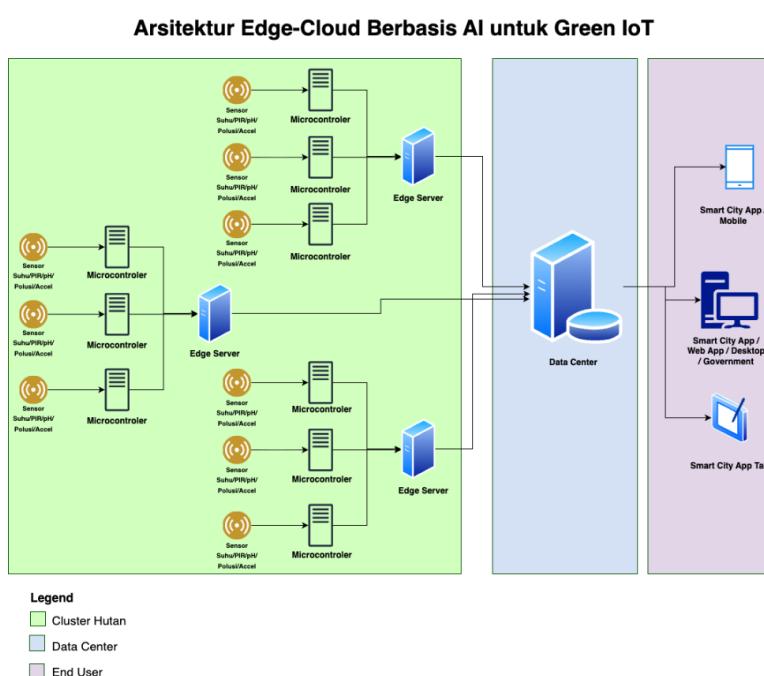
F. Alasan Pemilihan Metode

Metode kualitatif dipilih karena memberikan fleksibilitas untuk menggabungkan teori, teknologi, dan konteks lokal dalam satu kerangka konseptual yang koheren. Melalui integrasi antara hasil studi literatur dan analisis komparatif, penelitian ini tidak berupaya menghasilkan generalisasi statistik, melainkan memberikan kontribusi konseptual berupa rancangan arsitektur AI-driven *Edge–Cloud* yang efisien, hemat energi, dan sesuai untuk Green IoT di kawasan hutan tropis dengan sumber daya terbatas.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Arsitektur Usulan *Edge–Cloud* Berbasis AI untuk Green IoT

Arsitektur yang diusulkan dalam penelitian ini dirancang untuk menjawab keterbatasan infrastruktur listrik dan jaringan di kawasan hutan tropis. Secara umum, arsitektur terdiri atas empat lapisan utama, yaitu Smart Sensor Node, *Edge Gateway/Server*, *Cloud/Data Center*, dan Aplikasi Smart City. Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik dengan dukungan AI (AI ringan) dan sumber energi terbarukan berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sederhana.



Gambar 2. Arsitektur Edge–Cloud Berbasis AI.drawio

1) Smart Sensor Node

Lapisan pertama terdiri atas sensor lingkungan (misalnya suhu, asap, kelembaban, kualitas air, dan sensor gerakan) yang dipadukan dengan mikrokontroler hemat energi seperti ESP32 atau STM32. Pada lapisan ini diterapkan algoritma AI ringan (TinyML) untuk melakukan *pre-processing* data, meliputi:

- Filtrasi *noise* untuk mengurangi data tidak valid.
- Deteksi anomali awal, misalnya perubahan suhu drastis yang mengindikasikan potensi kebakaran.
- Kompresi atau agregasi data sehingga hanya informasi penting yang dikirim ke lapisan berikutnya.

Pendekatan ini sejalan dengan temuan Chun et al., (2011) dan Rudenko et al., (1998) yang menegaskan bahwa pemrosesan data lebih dekat ke sumber dapat menekan konsumsi energi sekaligus mempercepat respon sistem.

2) Edge Gateway

Lapisan kedua adalah *Edge Gateway* yang berfungsi mengumpulkan data dari beberapa Smart Sensor *Node* dalam satu *cluster*. *Edge Gateway* dapat berupa mini PC, Raspberry Pi, atau server berbasis ARM yang juga ditenagai oleh PLTS sederhana. Fungsinya meliputi:

- Agregasi data dari banyak *node*.
- Analitik awal menggunakan model AI skala ringan untuk memastikan hanya data relevan yang diteruskan ke *Cloud*.
- Manajemen prioritas data berdasarkan urgensi, misalnya peristiwa kebakaran atau intrusi manusia diprioritaskan untuk dikirim segera.

Pendekatan ini berbeda dengan model *Cloud-only* (*Sensor-Cloud*) yang menekankan semua pemrosesan di *Cloud* (Murwantara, 2022). Dengan adanya pemrosesan di *Edge*, sistem menjadi lebih hemat bandwidth dan tahan terhadap gangguan jaringan.

Selain itu, *Edge Gateway* memiliki kemampuan untuk mengurangi dampak latensi *end-to-end*. Walaupun analisis data di *node* atau *Edge* menimbulkan latensi komputasi lokal, keputusan awal dapat dihasilkan secara cepat tanpa harus menunggu *Cloud*. Untuk peristiwa yang bersifat sangat mendesak, *Edge Gateway* dapat mengirimkan notifikasi lokal langsung melalui SMS *Gateway* yang terhubung dengan operator seluler. Strategi ini memungkinkan pesan peringatan kritis tetap sampai ke pemangku kepentingan meskipun transmisi data ke *Cloud* mengalami keterlambatan atau gangguan jaringan internet. Dengan demikian, sistem tetap menjamin adanya *real-time local alerting* di lapangan untuk kasus darurat, misalnya potensi kebakaran hutan atau aktivitas intrusi

3) Cloud / Data Center

Lapisan ketiga adalah *Cloud/Data Center* yang menerima data dari *Edge* server. Pada lapisan ini, pemrosesan dilakukan lebih lanjut dengan analitik skala besar, *big data processing*, serta integrasi dengan dashboard monitoring untuk pemangku kebijakan. *Cloud* tetap dibutuhkan untuk penyimpanan jangka panjang, analisis tren, dan integrasi sistem dan aplikasi Smart City.

4) Aplikasi Smart City

Lapisan terakhir adalah Aplikasi yang digunakan oleh pengguna, baik pemerintah daerah, lembaga konservasi, maupun masyarakat. Data yang telah diproses ditampilkan dalam bentuk dashboard, notifikasi real-time, atau laporan prediktif. Fitur ini memungkinkan pengambilan keputusan cepat, misalnya mengirim peringatan kebakaran hutan atau deteksi intrusi di area konservasi.

Pada lapisan Aplikasi Smart City, sistem tidak hanya berfungsi menampilkan data monitoring, tetapi juga mendukung mekanisme deteksi kegagalan. Jika sebuah *Edge Server* tidak mengirim data dalam interval tertentu, maka sistem *Cloud* akan mengirimkan notifikasi kegagalan kepada administrator atau petugas lapangan. Kondisi ini harus ditindaklanjuti dengan inspeksi lapangan, karena hilangnya konektivitas *Edge* dapat menjadi indikasi adanya gangguan serius, misalnya kerusakan perangkat, gangguan suplai energi, atau bahkan peristiwa kritis seperti kebakaran hutan maupun aktivitas destruktif lain. Dengan cara ini, arsitektur tidak hanya mendukung monitoring

lingkungan secara proaktif, tetapi juga memberikan fungsi diagnosis tidak langsung terhadap kondisi infrastruktur IoT di lapangan.

Selain empat lapisan utama tersebut, rancangan arsitektur ini disusun dengan mempertimbangkan prinsip efisiensi daya, modularitas, dan skalabilitas sistem. Pemilihan mikrokontroler seperti ESP32 atau STM32 didasarkan pada kemampuannya untuk menjalankan algoritma TinyML dengan konsumsi daya rendah (di bawah 200 mA saat inferensi) (Espressif Systems, 2022) dan mendukung beragam protokol komunikasi seperti Wi-Fi, LoRa, dan Zigbee. Mikrokontroler ini juga memiliki ekosistem perangkat lunak yang matang (TensorFlow Lite Micro, *Edge Impulse*), sehingga memungkinkan pengembangan dan pembaruan model AI secara jarak jauh (Over-the-Air update).

Sementara itu, penggunaan *Edge Gateway* berbasis ARM atau Raspberry Pi memberikan fleksibilitas komputasi lebih besar tanpa meningkatkan konsumsi daya secara signifikan, karena dapat dioperasikan menggunakan daya ~5V (Aryani et al., 2020) DC dari PLTS sederhana. Pemilihan arsitektur berlapis seperti ini merupakan hasil kompromi antara kapasitas komputasi, efisiensi energi, dan keandalan jaringan yang merupakan tiga parameter yang paling krusial untuk operasional IoT di kawasan hutan tropis.

B. Alur Transmisi Data dan Protokol

Agar sistem dapat berjalan efisien di kawasan hutan tropis, pemilihan sensor dan protokol komunikasi harus mempertimbangkan konsumsi energi, keandalan, serta kompatibilitas dengan mikrokontroler ESP32 atau mikrokontroler hemat energi lain yang mendukung. Setiap sensor dipadukan dengan ESP32/mikrokontroler yang mendukung melalui antarmuka (interface) tertentu, kemudian hasil *pre-processing* dikirim ke *Edge Gateway*.

- 1) Deteksi Kebakaran Hutan (Sensor Suhu & Asap/CO₂)
 - Sensor: DHT22/BME280 (I²C), MQ-2/MQ-135 (ADC), MH-Z19B (UART).
 - Data yang dikirim: suhu, kelembaban, konsentrasi asap, kadar CO₂.
 - Protokol ke *Edge*: LoRa untuk transmisi jarak jauh, data dalam format JSON ringan.
- 2) Intrusi/Pergerakan Manusia (PIR & Kamera Trap)
 - Sensor: HC-SR501 PIR (Digital), OV2640 pada ESP32-CAM (SPI/parallel).
 - Data yang dikirim: status gerakan (0/1), klasifikasi hasil AI (manusia/hewan).
 - Protokol ke *Edge*: Zigbee atau WiFi untuk cluster sensor yang padat. Hanya event penting (misalnya deteksi manusia) yang dikirim, bukan semua frame.
- 3) Kualitas Air (pH, DO, Turbidity)
 - Sensor: pH Sensor Kit, DO Sensor, Turbidity SEN0189 (semua via ADC).
 - Data yang dikirim: nilai pH, kadar oksigen terlarut (DO), tingkat kekeruhan.
 - Protokol ke *Edge*: LoRa untuk efisiensi energi, dengan interval pengiriman periodik. Data hanya dikirim sebagai alert jika terjadi perubahan drastis.
- 4) Polusi Udara (PM2.5, CO, NO₂)
 - Sensor: PMS5003/SDS011 (UART), MQ-7 (ADC), MiCS-6814 (I²C).
 - Data yang dikirim: konsentrasi PM2.5, CO, NO₂.
 - Protokol ke *Edge*: Zigbee/LoRa sesuai jarak node. Data dikirim periodik, dengan event trigger jika melebihi ambang batas WHO.
- 5) Getaran Tanah (Accelerometer/Seismometer)
 - Sensor: MPU-6050/ADXL345 (I²C/SPI), Geophone SM-24 (ADC).
 - Data yang dikirim: data akselerasi/getaran setelah diproses dengan FFT.
 - Protokol ke *Edge*: LoRa untuk jarak jauh. Hanya event alert (indikasi gempa/landslide) yang dikirim ke *Cloud*.

C. Analisis Potensi Keunggulan

Arsitektur *Edge–Cloud* berbasis AI untuk Green IoT memiliki beberapa keunggulan konseptual dibandingkan pendekatan *Cloud-only* (*Sensor–Cloud*) yang banyak diterapkan di perkotaan. Keunggulan ini dianalisis dari empat aspek utama: efisiensi energi, efisiensi bandwidth, latensi sistem, dan keberlanjutan operasional.

1. Efisiensi Energi

Pada pendekatan *Cloud-only*, semua data mentah dari sensor dikirim langsung ke *Cloud*, sehingga *node* IoT harus terus aktif dalam proses transmisi. Hal ini menyebabkan konsumsi energi tinggi, yang tidak sesuai untuk kawasan hutan tropis dengan keterbatasan listrik.

Sebaliknya, arsitektur usulan menggunakan AI ringan (TinyML) untuk melakukan *pre-processing* di *node*, sehingga hanya data penting yang dikirim. Hal ini memungkinkan penghematan daya karena data tidak dikirim secara terus menerus.

2. Efisiensi Bandwidth

Jumlah data yang dihasilkan oleh sensor lingkungan sangat besar, misalnya data dari kamera trap atau sensor getaran yang dapat mencapai ribuan data per detik. Pada sistem konvensional, data ini harus dikirim ke *Cloud* secara penuh, yang membebani jaringan dan meningkatkan biaya operasional (Etaati, 2024).

Dalam arsitektur usulan, data difilter di *Edge* sehingga hanya *event alert* atau informasi ringkas yang dikirim ke *Cloud*. Hal ini mengurangi kebutuhan bandwidth dan membuat sistem lebih layak diterapkan di daerah dengan keterbatasan jaringan.

3. Latensi Sistem

Smart City menuntut sistem yang mampu merespons cepat, misalnya pada kasus kebakaran hutan atau intrusi manusia. Pada arsitektur *Cloud-only*, data harus melewati jalur sensor, *Cloud*, aplikasi sebelum menghasilkan peringatan, sehingga rawan keterlambatan.

Dengan pemrosesan di *Edge*, deteksi anomali dapat dilakukan dekat dengan sumber data, sehingga alert dapat dihasilkan hampir secara *real-time* tanpa bergantung sepenuhnya pada koneksi internet.

4. Keberlanjutan Operasional

Keunggulan lain dari arsitektur ini adalah integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sederhana pada *node* dan *Edge* server. Dengan demikian, sistem dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan listrik konvensional, yang menjadikannya cocok untuk kawasan hutan tropis. Hal ini relevan dengan studi Beltsazaran. (2023) mengenai strategi hemat energi pada *Forestry IoT* pada perangkat prototipe sensor kebakaran hutan, yang menekankan pentingnya penggunaan energi terbarukan untuk menjaga keberlanjutan operasi perangkat IoT di lapangan.

5. Perbandingan Kinerja Teknis

Jika dibandingkan dengan sistem *Cloud-only* (*Sensor–Cloud*) dan *fog computing* konvensional, arsitektur usulan ini memiliki rasio efisiensi energi dan latensi yang lebih baik berdasarkan hasil studi terdahulu. Shi et al. (2016) menegaskan bahwa *Edge* computing memiliki potensi untuk mengatasi berbagai isu penting, seperti kebutuhan waktu respons yang cepat, keterbatasan daya baterai, penghematan biaya bandwidth, serta keamanan dan privasi data. Pemrosesan kecerdasan buatan di sisi *Edge* dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada *Cloud* melalui penurunan beban transmisi serta latensi komunikasi, terutama pada sistem IoT berskala besar. Pendekatan ini sejalan dengan temuan Li et al. (2020) yang menyimpulkan bahwa sebuah sistem *Edge* AI tertanam yang mampu melakukan deteksi kebakaran dan asap hutan secara *real-time* dengan memanfaatkan model Deep Learning (DL) yang telah dikompresi. Pendekatan kompresi model tersebut memungkinkan penyediaan model yang ringan sehingga optimal untuk implementasi *Edge* AI. Pada penelitian yang dilakukan Nguyen et al. (2019) juga menerangkan bahwa Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan (*Edge Computing*) secara signifikan mengungguli pendekatan terpusat konvensional dalam hal skalabilitas, pengambilan keputusan *real-time*, dan efisiensi energi.

Selain itu, integrasi PLTS sederhana pada *node* dan *Edge* memastikan keberlanjutan daya selama 8–10 jam operasi harian, sementara mekanisme SMS *Gateway* menjamin jalur komunikasi alternatif ketika jaringan internet gagal. Kombinasi ini meningkatkan reliabilitas sistem dalam konteks hutan tropis yang memiliki variabilitas cuaca dan infrastruktur terbatas.

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan sebuah arsitektur konseptual *Edge–Cloud* berbasis AI (AI-driven) dalam mendukung implementasi Green IoT pada Smart City di kawasan hutan tropis. Berdasarkan analisis, tujuan tersebut telah tercapai dengan menghasilkan model arsitektur yang mampu mengatasi keterbatasan energi dan jaringan melalui integrasi AI ringan (TinyML), *Edge* *Gateway* adaptif, serta pemanfaatan PLTS sederhana sebagai sumber energi terbarukan.

Hasil kajian menunjukkan bahwa arsitektur ini berkontribusi pada pengembangan AI dan IoT dengan cara:

- 1) Menghadirkan mekanisme *pre-processing* berbasis AI ringan di tingkat sensor, yang secara signifikan menekan konsumsi energi transmisi dan mengurangi kebutuhan bandwidth.
- 2) Memberikan jalur mitigasi latensi melalui notifikasi lokal berbasis SMS *Gateway*, sehingga sistem tetap mampu menghasilkan *alert* kritis meskipun koneksi *Cloud* tidak stabil.
- 3) Mendukung keberlanjutan operasional perangkat IoT di kawasan minim infrastruktur melalui integrasi energi terbarukan, yang secara langsung relevan dengan prinsip inovasi hijau.
- 4) Menawarkan perluasan konsep Smart City dari konteks urban menuju ekosistem hutan tropis, sehingga memperluas cakupan penerapan AI dan IoT untuk konservasi lingkungan dan mitigasi bencana.

Dengan demikian, kontribusi baru dari penelitian ini terletak pada formulasi arsitektur *Edge–Cloud* AI-driven yang hemat energi, tangguh terhadap keterbatasan infrastruktur, dan berorientasi pada inovasi hijau. Arsitektur ini dapat menjadi landasan awal untuk implementasi nyata dalam monitoring lingkungan, konservasi hutan, dan pengelolaan Smart City berkelanjutan di wilayah terpencil.

Penelitian selanjutnya perlu dilakukan untuk validasi empiris model arsitektur ini melalui:

- 1) Simulasi performa menggunakan *Edge cluster* dan microcontroller *node* nyata (misalnya ESP32 + TinyML).
- 2) Pengukuran langsung terhadap efisiensi energi, latensi, dan reliabilitas komunikasi.
- 3) Integrasi dengan platform Smart City berbasis open data guna menguji interoperabilitas dengan sistem yang berjalan.
- 4) Analisis kelayakan ekonomi penerapan PLTS mikro untuk node IoT di kawasan hutan tropis.

5. Pengakuan

Penulis mengucapkan terima kasih pada Pak Anton Praffanto atas masukannya terkait IoT, serta terima kasih kepada Waktu yang membawa hingga sampai pada penulisan ini.

6. Daftar Pustaka

- Etaati, A. (2024). Smart forest monitoring: A novel Internet of Things framework. *IET Networks*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1049/ntw2.12135>
- Murwantara, I. M. (2022). Pengembangan Sensor-*Cloud* pada Smart City untuk Menghadirkan Ketersediaan Data Waktu Nyata. *Jurnal ISD* (*ejournal-medan.uph.edu*)
- Chun, B.-G., Ihm, S., Maniatis, P., Naik, M., & Patti, A. (2011). CloneCloud: Elastic execution between mobile device and *Cloud*. In *Proceedings of the 6th Conference on Computer Systems* (pp. 301–314).
- Rudenko, A., Reiher, P., Popek, G. J., & Kuenning, G. H. (1998). Saving portable computer battery power through remote process execution. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2(1), 19–26.
- Hunt, G. C., & Scott, M. L. (1999). The coign automatic distributed partitioning system. In *Proceedings of OSDI* (Vol. 99, pp. 187–200).

- Kumar, K., & Lu, Y.-H. (2010). *Cloud computing for mobile users: Can offloading computation save energy?* Computer, 43(4), 51–56.
- Kosta, S., Aucinas, A., Hui, P., Mortier, R., & Zhang, X. (2012). ThinkAir: Dynamic resource allocation and parallel execution in the *Cloud* for mobile code offloading. In IEEE INFOCOM 2012 (pp. 945–953).
- Misiukas, J. M., Carter, S., & Herold, M. (2021). Tropical Forest Monitoring: Challenges and Recent Progress in Research. *Remote Sensing*, 13(12), 2252.
- Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.). SAGE Publications.
- Espressif Systems. (2022). ESP32 series datasheet (Version 3.9). Espressif Systems. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Aryani, D., Supriyono, I. A., Ariessanti, H. D., & Holilan, I. (2020). Perancangan smart hydroponics berbasis Raspberry Pi 3. Seminar Nasional Energi, Kelistrikan dan Teknik Informatika (SNEKTI 2020). Universitas Esa Unggul. https://digilib.esaunggul.ac.id/public/UEU-Article-15867-5_0291.pdf
- Beltsazaran, B., Danang, D., Suasana, I. S., Sasmoko, D., & Adi Putra, T. W. (2023). Prototipe sensor pendekripsi kebakaran hutan berbasis transmisi LoRa dan solar panel. *Jurnal Informatika dan Teknologi Komputer*, Universitas Sains dan Teknologi Komputer.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). *Edge computing: Vision and challenges*. IEEE Internet of Things Journal, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- Li, X., Xu, H., Wang, J., & Yang, F. (2020). *Edge intelligent computing for forest wildfire detection and alerting*. IEEE Access, 8, 48923–48934.
- Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., & Seneviratne, A. (2019). *Edge computing-based environmental monitoring system: Architecture, challenges, and solutions*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3), 2561–2583.