

Pengembangan Digital Twin Smart Campus untuk Monitoring Infrastruktur Perguruan Tinggi

Akhmad Fauzi^{1*}, Yahdi Firmansyah², Nunung Fatmawati³

Universitas Muhammadiyah Banten, Indonesia

afauzi@umbanten.ac.id^{1*}, yahdi.firmansyah@umbanten.ac.id², nunung79@umbanten.ac.id³

Article history

Received : 26-06-2026

Revised : 29-06-2026

Accepted : 02-07-2026

*Corresponding Author

Akhmad Fauzi

E-Mail : afauzi@umbanten.ac.id

Abstrak

Transformasi digital pada perguruan tinggi mendorong kebutuhan sistem monitoring infrastruktur kampus yang lebih efektif, terintegrasi, dan real-time. Permasalahan utama yang dihadapi adalah keterbatasan sistem monitoring konvensional yang masih berbasis dashboard numerik sehingga kurang mampu merepresentasikan kondisi infrastruktur kampus secara visual dan interaktif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem Digital Twin Smart Campus untuk monitoring infrastruktur perguruan tinggi berbasis Internet of Things (IoT). Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan prototype yang meliputi tahapan analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, implementasi IoT, pengembangan Digital Twin, serta pengujian sistem. Sistem dikembangkan menggunakan sensor IoT, Firebase Realtime Database, protokol MQTT, dan visualisasi virtual berbasis Unity3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring suhu ruangan, kelembaban lingkungan, konsumsi energi listrik, dan status perangkat jaringan secara real-time dengan rata-rata latency komunikasi sebesar 2,1 detik dan tingkat akurasi sensor mencapai 97%. Implementasi Digital Twin juga mampu meningkatkan efektivitas monitoring infrastruktur kampus melalui visualisasi virtual berbasis 3D yang lebih interaktif dan intuitif dibandingkan dashboard konvensional. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan smart campus berbasis Digital Twin dalam mendukung pengelolaan infrastruktur perguruan tinggi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Digital Twin; Smart Campus; Internet of Things; Monitoring Infrastruktur; Perguruan Tinggi

Abstract

Digital transformation in higher education has increased the need for more effective, integrated, and real-time campus infrastructure monitoring systems. The main challenge lies in the limitations of conventional monitoring systems that rely on numerical dashboards and are unable to visually and interactively represent campus infrastructure conditions. This study aims to develop a Digital Twin Smart Campus system for higher education infrastructure monitoring based on the Internet of Things (IoT). The research employed a Research and Development (R&D) approach using a prototype development model consisting of requirement analysis, system architecture design, IoT implementation, Digital Twin development, and system testing stages. The system was developed using IoT sensors, Firebase Realtime Database, MQTT protocol, and Unity3D-based virtual visualization. The results indicate that the system successfully performs real-time monitoring of room temperature, environmental humidity, electrical energy consumption, and network device status with an average

communication latency of 2.1 seconds and sensor accuracy reaching 97%. The implementation of the Digital Twin also improves the effectiveness of campus infrastructure monitoring through more interactive and intuitive 3D virtual visualization compared to conventional dashboards. This study contributes to the development of Digital Twin-based smart campus systems in supporting more efficient, adaptive, and sustainable higher education infrastructure management.

Keywords: Digital Twin; Smart Campus; Internet of Things; Infrastructure Monitoring; Higher Education

PENDAHULUAN

Transformasi digital pada sektor pendidikan tinggi terus berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan institusi dalam mengelola layanan akademik, fasilitas, serta infrastruktur kampus secara efektif dan berkelanjutan. Konsep *smart campus* muncul sebagai bagian dari implementasi teknologi cerdas yang mengintegrasikan *Internet of Things* (IoT), *cloud computing*, *big data*, *Artificial Intelligence* (AI), dan *cyber physical systems* untuk meningkatkan efisiensi operasional serta kualitas layanan pendidikan tinggi (Alshuqayran et al., 2023; Min-Allah & Alrashed, 2020). Smart campus tidak hanya berfokus pada digitalisasi administrasi akademik, tetapi juga mencakup pengelolaan infrastruktur fisik kampus secara real-time dan terintegrasi (Nie, 2021).

Perkembangan teknologi IoT memberikan peluang besar dalam mendukung sistem monitoring lingkungan kampus secara otomatis melalui integrasi sensor, perangkat jaringan, dan sistem informasi berbasis data real-time. Implementasi IoT pada lingkungan perguruan tinggi telah digunakan untuk monitoring energi, keamanan gedung, pengelolaan ruang kelas, monitoring suhu, pencahayaan, hingga pengawasan fasilitas kampus secara terintegrasi (Atzori et al., 2017; Khan et al., 2022). Pemanfaatan teknologi tersebut memungkinkan institusi pendidikan melakukan pengambilan keputusan berbasis data sehingga meningkatkan efisiensi operasional kampus (Sungheetha & Sharma, 2023).

Meskipun demikian, sebagian besar sistem monitoring infrastruktur perguruan tinggi saat ini masih menggunakan dashboard konvensional yang hanya menampilkan data numerik tanpa representasi visual kondisi fisik kampus secara menyeluruh. Kondisi tersebut menyebabkan proses monitoring infrastruktur menjadi kurang intuitif, sulit dianalisis secara spasial, dan kurang mendukung pengambilan keputusan secara cepat. Selain itu, pengelolaan fasilitas kampus yang tersebar di berbagai lokasi sering kali menimbulkan keterlambatan dalam identifikasi kerusakan infrastruktur maupun pemborosan energi akibat kurang optimalnya sistem pengawasan (Qi et al., 2022).

Digital Twin menjadi salah satu teknologi yang dinilai mampu menjawab tantangan tersebut melalui penyediaan representasi virtual dari objek fisik yang terhubung secara real-time menggunakan sensor dan sistem komunikasi data. Konsep Digital Twin memungkinkan sinkronisasi antara lingkungan fisik dan virtual sehingga kondisi infrastruktur dapat dipantau secara dinamis, akurat, dan interaktif (Tao et al., 2019). Teknologi ini awalnya banyak diterapkan pada sektor manufaktur dan industri, namun saat ini mulai berkembang pada bidang *smart city*, *smart building*, hingga *smart campus* (Fuller et al., 2020; Jones et al., 2020).

Penerapan Digital Twin pada lingkungan pendidikan tinggi memberikan berbagai manfaat, seperti monitoring infrastruktur berbasis visualisasi 3D, simulasi penggunaan fasilitas, optimasi energi, *predictive maintenance*, serta peningkatan efisiensi pengelolaan aset kampus. Penelitian Tong dan Chen (2023) menjelaskan bahwa integrasi Digital Twin dengan IoT, *Building Information Modeling* (BIM), dan *Geographic Information Systems* (GIS) mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan kampus dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara real-time. Selain itu, penelitian Qi et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan Digital Twin pada *smart campus* dapat membantu pengawasan fasilitas kampus melalui visualisasi virtual yang lebih interaktif dibandingkan dashboard monitoring konvensional.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem *smart campus* berbasis IoT untuk monitoring lingkungan kampus. Sungheetha dan Sharma (2023) mengembangkan visualisasi data sensor IoT pada *smart campus* untuk monitoring lingkungan berbasis dashboard digital. Penelitian

lain juga membahas implementasi Digital Twin pada *intelligent campus system* menggunakan teknologi Unity3D dan *point cloud modeling* untuk meningkatkan monitoring dan pengelolaan fasilitas pendidikan (Liu et al., 2022). Sementara itu, penelitian mengenai *smart campus management platform* berbasis Digital Twin menunjukkan bahwa teknologi tersebut mampu meningkatkan efisiensi manajemen pendidikan melalui integrasi *big data* dan monitoring digital secara real-time (Wang et al., 2023).

Penelitian terkait Digital Twin dalam konteks pendidikan juga mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Studi *systematic literature review* yang dilakukan oleh Prasetyo et al. (2024) menunjukkan bahwa implementasi Digital Twin pada ekosistem pendidikan terbagi ke dalam beberapa domain utama, yaitu *adaptive learning*, *immersive learning*, dan *smart campus facility management* berbasis IoT. Selain itu, survei terbaru mengenai pengembangan *sustainable smart campus* menegaskan bahwa integrasi AI, IoT, dan Digital Twin menjadi fondasi utama transformasi digital perguruan tinggi modern (Rahman et al., 2025).

Walaupun berbagai penelitian telah membahas implementasi *smart campus* dan Digital Twin, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*). Pertama, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengelolaan gedung atau *smart building* secara parsial dan belum mengintegrasikan monitoring infrastruktur kampus secara menyeluruh. Kedua, implementasi Digital Twin pada lingkungan perguruan tinggi di Indonesia masih relatif terbatas dan lebih banyak berada pada tahap konseptual atau simulasi. Ketiga, penelitian sebelumnya umumnya belum mengintegrasikan visualisasi virtual interaktif dengan sistem monitoring real-time berbasis IoT pada infrastruktur kampus secara komprehensif (Fuller et al., 2020; Qi et al., 2022).

Selain itu, tantangan implementasi *smart campus* juga berkaitan dengan kebutuhan sistem monitoring yang mampu menyediakan data secara cepat, akurat, dan mudah dipahami oleh pengelola kampus. Penggunaan dashboard berbasis tabel dan grafik sering kali belum mampu menggambarkan kondisi aktual infrastruktur secara visual dan spasial. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru yang mampu menghubungkan data sensor dengan representasi virtual lingkungan kampus sehingga proses monitoring menjadi lebih intuitif dan responsif terhadap perubahan kondisi infrastruktur (Khan et al., 2022).

Dalam konteks pengelolaan fasilitas kampus berkelanjutan, penerapan Digital Twin juga memiliki potensi besar dalam mendukung efisiensi energi dan pengelolaan sumber daya kampus. Penelitian mengenai *sustainable smart campus* menunjukkan bahwa integrasi Digital Twin dengan IoT dapat membantu institusi pendidikan melakukan monitoring konsumsi energi, optimasi penggunaan fasilitas, serta pengambilan keputusan berbasis data secara lebih efektif (Rahman et al., 2025). Teknologi ini bahkan mulai diarahkan menuju implementasi *predictive maintenance* dan *autonomous campus management* berbasis AI dan analitik cerdas (Wang et al., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem Digital Twin Smart Campus untuk monitoring infrastruktur perguruan tinggi secara real-time dan terintegrasi. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan teknologi IoT untuk memperoleh data kondisi infrastruktur kampus, kemudian merepresentasikannya ke dalam model virtual berbasis Digital Twin sehingga memungkinkan proses monitoring dilakukan secara interaktif dan visual. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan *smart campus* berbasis Digital Twin pada lingkungan perguruan tinggi serta mendukung transformasi digital pengelolaan infrastruktur kampus menuju sistem yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan sistem berbasis *prototype* untuk membangun Digital Twin Smart Campus yang mampu melakukan monitoring infrastruktur perguruan tinggi secara real-time. Pendekatan R&D dipilih karena penelitian tidak hanya berfokus pada analisis teoritis, tetapi juga menghasilkan produk teknologi berupa sistem monitoring digital berbasis Digital Twin yang dapat diimplementasikan pada lingkungan kampus (Sugiyono, 2022; Creswell & Creswell, 2018). Model *prototype* digunakan karena mampu mendukung proses pengembangan sistem secara iteratif sehingga memungkinkan penyesuaian kebutuhan pengguna selama proses pengembangan berlangsung (Pressman & Maxim, 2020).

Metode penelitian terdiri atas beberapa tahapan utama, yaitu analisis kebutuhan sistem, perancangan arsitektur Digital Twin, implementasi sistem IoT, pengembangan model virtual Digital Twin, integrasi dashboard monitoring, serta pengujian dan evaluasi sistem. Tahapan tersebut mengacu pada konsep pengembangan Digital Twin berbasis *cyber physical systems* yang mengintegrasikan objek fisik dengan representasi virtual secara sinkron melalui komunikasi data real-time (Tao et al., 2019; Fuller et al., 2020).

Analisis Kebutuhan Sistem

Tahap awal penelitian dilakukan melalui analisis kebutuhan sistem untuk mengidentifikasi kebutuhan monitoring infrastruktur pada lingkungan perguruan tinggi. Analisis dilakukan melalui observasi langsung terhadap fasilitas kampus, wawancara dengan pengelola sarana dan prasarana, serta studi dokumentasi terhadap sistem monitoring yang telah digunakan sebelumnya. Analisis kebutuhan menjadi tahapan penting dalam pengembangan smart campus karena menentukan kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem yang akan dikembangkan (Min-Allah & Alrashed, 2020).

Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap beberapa komponen infrastruktur kampus yang menjadi objek monitoring, antara lain penggunaan energi listrik, suhu ruangan, kelembaban lingkungan, kondisi jaringan internet, serta status perangkat fasilitas kampus. Data kebutuhan tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan jenis sensor IoT, platform komunikasi data, serta model visualisasi Digital Twin yang akan dibangun (Khan et al., 2022).

Perancangan Arsitektur Sistem

Tahap berikutnya adalah perancangan arsitektur sistem Digital Twin Smart Campus. Arsitektur sistem dirancang menggunakan konsep integrasi IoT, *cloud computing*, basis data, dan visualisasi Digital Twin berbasis 3D. Sistem terdiri atas tiga lapisan utama, yaitu lapisan pengumpulan data (*data acquisition layer*), lapisan komunikasi dan pemrosesan data (*data processing layer*), serta lapisan visualisasi Digital Twin (*visualization layer*) (Jones et al., 2020).

Lapisan pengumpulan data menggunakan sensor IoT untuk memperoleh data kondisi infrastruktur kampus secara real-time. Sensor yang digunakan meliputi sensor suhu dan kelembaban DHT22, sensor arus listrik PZEM-004T, serta modul monitoring jaringan berbasis ESP32. Data dari sensor dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju server menggunakan protokol MQTT karena memiliki efisiensi komunikasi data yang tinggi pada lingkungan IoT (Al-Fuqaha et al., 2015).

Lapisan pemrosesan data menggunakan server berbasis *cloud database* untuk menyimpan, mengolah, dan mengintegrasikan data sensor secara real-time. Basis data yang digunakan adalah Firebase Realtime Database karena mendukung sinkronisasi data secara cepat dan ringan untuk aplikasi monitoring berbasis IoT (Rahman et al., 2023). Selanjutnya, lapisan visualisasi menggunakan model Digital Twin berbasis Unity3D untuk merepresentasikan kondisi infrastruktur kampus dalam bentuk virtual 3D yang interaktif (Liu et al., 2022).

Implementasi Internet of Things (IoT)

Implementasi IoT dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai sensor monitoring ke dalam sistem Digital Twin Smart Campus. Sensor IoT berfungsi sebagai perangkat pengumpulan data kondisi lingkungan dan infrastruktur kampus secara real-time. Implementasi IoT pada lingkungan smart campus dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi monitoring fasilitas pendidikan karena memungkinkan proses pengawasan dilakukan secara otomatis dan terintegrasi (Atzori et al., 2017).

Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali sensor karena memiliki kemampuan konektivitas Wi-Fi serta efisiensi daya yang baik untuk aplikasi smart campus (Saputra & Nugroho, 2022). Data sensor dikirimkan secara periodik menuju server menggunakan protokol MQTT dan HTTP API. Penggunaan MQTT pada sistem IoT telah banyak digunakan dalam penelitian monitoring real-time karena memiliki latensi rendah dan mendukung komunikasi data ringan (*lightweight communication*) (Bankov et al., 2018).

Data yang diperoleh dari sensor kemudian disimpan pada basis data *cloud* dan ditampilkan pada dashboard monitoring berbasis web. Dashboard dirancang untuk menampilkan data kondisi infrastruktur kampus secara real-time dalam bentuk grafik, indikator status, dan notifikasi sistem (Sungheetha & Sharma, 2023).

Pengembangan Digital Twin

Pengembangan Digital Twin dilakukan dengan membangun representasi virtual lingkungan kampus menggunakan perangkat lunak Unity3D dan Blender 3D. Model virtual dibuat berdasarkan denah dan struktur fisik bangunan kampus sehingga mampu merepresentasikan kondisi aktual infrastruktur secara visual dan interaktif (Qi et al., 2022).

Digital Twin dikembangkan menggunakan konsep sinkronisasi data real-time antara objek fisik dan model virtual. Setiap perubahan data yang diperoleh dari sensor IoT akan secara otomatis diperbarui pada model virtual Digital Twin. Pendekatan tersebut memungkinkan pengelola kampus melakukan monitoring kondisi infrastruktur secara visual dan intuitif (Tao et al., 2019).

Implementasi Digital Twin juga mendukung visualisasi status perangkat kampus melalui indikator warna, animasi kondisi perangkat, serta notifikasi kerusakan sistem. Penggunaan visualisasi virtual dalam monitoring smart campus dinilai mampu meningkatkan efektivitas pengawasan fasilitas dan mempercepat proses pengambilan keputusan (Wang et al., 2023).

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa metode, yaitu observasi, wawancara, dokumentasi, dan pengambilan data sensor secara otomatis. Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi infrastruktur kampus dan kebutuhan monitoring sistem. Wawancara dilakukan kepada pengelola fasilitas kampus untuk memperoleh informasi mengenai kendala pengawasan infrastruktur serta kebutuhan sistem monitoring digital.

Selain itu, data primer penelitian diperoleh secara langsung dari sensor IoT yang terpasang pada lingkungan kampus. Data sensor meliputi suhu ruangan, konsumsi energi listrik, status perangkat jaringan, dan kondisi lingkungan kampus lainnya. Pengumpulan data berbasis sensor memungkinkan penelitian memperoleh data aktual secara real-time sehingga meningkatkan validitas sistem monitoring (Zhou et al., 2019).

Teknik Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi performa dan efektivitas Digital Twin Smart Campus yang telah dikembangkan. Pengujian terdiri atas pengujian fungsional sistem (*black box testing*), pengujian performa komunikasi data, serta pengujian usability pengguna. *Black box testing* digunakan untuk memastikan seluruh fitur sistem berjalan sesuai kebutuhan fungsional (Pressman & Maxim, 2020).

Pengujian performa dilakukan dengan mengukur waktu respons pengiriman data sensor menuju dashboard dan Digital Twin. Parameter yang diuji meliputi latency komunikasi data, akurasi pembacaan sensor, serta kestabilan sinkronisasi data real-time. Pengujian performa sangat penting dalam sistem IoT karena menentukan kualitas monitoring dan kecepatan pembaruan data pada Digital Twin (Khan et al., 2022).

Pengujian usability dilakukan menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) untuk mengetahui tingkat kemudahan penggunaan sistem oleh pengguna. Metode SUS banyak digunakan dalam evaluasi sistem informasi karena memiliki tingkat reliabilitas dan validitas yang baik dalam mengukur pengalaman pengguna (Brooke, 1996).

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif terhadap hasil monitoring dan pengujian sistem. Data hasil sensor dianalisis untuk mengetahui stabilitas sistem monitoring real-time dan performa komunikasi data antara sensor IoT dan Digital Twin. Selain itu, hasil pengujian usability dianalisis menggunakan skor SUS untuk menentukan tingkat penerimaan pengguna terhadap sistem yang dikembangkan.

Analisis juga dilakukan terhadap efektivitas penggunaan Digital Twin dalam mendukung monitoring infrastruktur kampus dibandingkan sistem monitoring konvensional. Pendekatan analisis tersebut bertujuan untuk mengevaluasi kontribusi implementasi Digital Twin terhadap pengelolaan fasilitas perguruan tinggi berbasis smart campus (Fuller et al., 2020; Rahman et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengembangan sistem Digital Twin Smart Campus untuk monitoring infrastruktur perguruan tinggi beserta analisis performa sistem, integrasi Internet of Things (IoT), visualisasi Digital Twin, dan evaluasi efektivitas implementasi sistem pada lingkungan kampus. Pembahasan dilakukan dengan mengaitkan hasil penelitian dengan teori dan penelitian terdahulu sehingga mampu menunjukkan kontribusi ilmiah serta kebaruan penelitian yang dikembangkan.

Analisis Kebutuhan Sistem Monitoring Infrastruktur Kampus

Tahap awal penelitian dilakukan melalui observasi lapangan dan wawancara dengan pengelola fasilitas kampus untuk mengidentifikasi kebutuhan monitoring infrastruktur perguruan tinggi. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses monitoring infrastruktur pada lingkungan kampus masih dilakukan secara manual dan belum terintegrasi dalam satu sistem monitoring real-time. Pengawasan terhadap penggunaan energi listrik, kondisi jaringan internet, suhu ruangan, serta perangkat laboratorium masih dilakukan secara berkala sehingga sering menyebabkan keterlambatan identifikasi gangguan fasilitas.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa pengelola kampus membutuhkan sistem monitoring yang mampu menyediakan data kondisi infrastruktur secara real-time, memberikan notifikasi dini terhadap kerusakan perangkat, serta menampilkan visualisasi kondisi kampus secara intuitif dan interaktif. Hasil tersebut mendukung penelitian Min-Allah dan Alrashed (2020) yang menyatakan bahwa pengembangan smart campus memerlukan integrasi teknologi IoT dan sistem monitoring cerdas untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan fasilitas pendidikan. Selain itu, Khan et al. (2022) menjelaskan bahwa kebutuhan utama smart campus modern terletak pada kemampuan monitoring real-time yang mendukung otomatisasi pengawasan infrastruktur dan pengambilan keputusan berbasis data.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Saputra dan Nugroho (2022) mengembangkan smart campus berbasis IoT untuk monitoring lingkungan perguruan tinggi menggunakan dashboard digital. Namun, penelitian tersebut masih terbatas pada penyajian data berbasis grafik dan tabel sehingga belum menyediakan visualisasi lingkungan kampus secara virtual. Sementara itu, penelitian Sungheetha dan Sharma (2023) hanya berfokus pada monitoring data sensor lingkungan kampus tanpa mengintegrasikan representasi visual Digital Twin. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif melalui integrasi monitoring IoT dengan visualisasi Digital Twin berbasis 3D secara real-time.

Perancangan Arsitektur Digital Twin Smart Campus

Arsitektur sistem Digital Twin Smart Campus dirancang menggunakan konsep integrasi IoT, cloud computing, database real-time, dan visualisasi virtual berbasis 3D. Sistem terdiri atas tiga lapisan utama, yaitu *data acquisition layer*, *data processing layer*, dan *visualization layer*. Pendekatan arsitektur tersebut mengacu pada konsep Digital Twin yang dikemukakan oleh Tao et al. (2019), yaitu integrasi sinkron antara objek fisik dan model virtual melalui komunikasi data real-time.

Pada lapisan *data acquisition*, sensor IoT digunakan untuk memperoleh data kondisi infrastruktur kampus secara real-time. Sensor DHT22 digunakan untuk monitoring suhu dan kelembaban ruangan, sedangkan sensor PZEM-004T digunakan untuk monitoring konsumsi energi listrik. Seluruh sensor dikendalikan menggunakan ESP32 yang berfungsi sebagai gateway komunikasi data. Data sensor dikirim menuju server menggunakan protokol MQTT karena memiliki efisiensi komunikasi yang tinggi dan mendukung sistem monitoring real-time berbasis IoT (Al-Fuqaha et al., 2015).

Lapisan *data processing* menggunakan Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan dan sinkronisasi data sensor. Penggunaan cloud database memungkinkan proses pembaruan data berjalan secara cepat dan stabil sehingga mendukung sinkronisasi data antara sensor fisik dan model Digital Twin secara kontinu. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian Rahman et al. (2023) yang menjelaskan bahwa penggunaan cloud-based architecture pada smart campus mampu meningkatkan fleksibilitas dan skalabilitas sistem monitoring berbasis IoT.

Pada lapisan *visualization layer*, sistem menggunakan Unity3D dan Blender 3D untuk membangun model virtual lingkungan kampus. Model virtual dibuat menyerupai kondisi fisik bangunan kampus sehingga memungkinkan pengguna melakukan monitoring infrastruktur secara visual dan interaktif. Penelitian Liu et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan visualisasi 3D pada Digital Twin mampu meningkatkan efektivitas monitoring smart campus dibandingkan dashboard konvensional berbasis teks dan grafik. Penelitian ini mengembangkan pendekatan tersebut dengan menambahkan sinkronisasi data sensor secara real-time sehingga kondisi virtual kampus selalu sesuai dengan kondisi aktual infrastruktur fisik.

Hasil perancangan arsitektur menunjukkan bahwa integrasi IoT dan Digital Twin mampu membangun sistem monitoring terpusat yang mendukung pengawasan infrastruktur kampus secara lebih efektif dan responsif. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya mengembangkan sistem monitoring parsial, penelitian ini mengintegrasikan monitoring multi-infrastruktur kampus ke dalam satu platform Digital Twin berbasis real-time.

Implementasi Dashboard Monitoring Real-Time

Dashboard monitoring dikembangkan berbasis web untuk menampilkan data sensor secara real-time dalam bentuk grafik, indikator status perangkat, dan notifikasi sistem. Dashboard monitoring dirancang untuk menampilkan kondisi suhu ruangan, kelembaban, penggunaan energi listrik, serta status jaringan internet secara terintegrasi.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa dashboard mampu melakukan pembaruan data secara otomatis setiap beberapa detik sehingga memungkinkan pengguna melakukan monitoring kondisi infrastruktur secara langsung. Sistem juga mampu memberikan notifikasi ketika terjadi peningkatan suhu ruangan atau lonjakan penggunaan energi listrik melebihi batas normal.

Hasil penelitian ini mendukung penelitian Sungheetha dan Sharma (2023) yang menyatakan bahwa dashboard monitoring berbasis IoT mampu meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan kampus secara digital. Namun, penelitian sebelumnya masih terbatas pada visualisasi berbasis data numerik dan grafik. Penelitian ini mengembangkan pendekatan yang lebih interaktif melalui integrasi dashboard dengan visualisasi Digital Twin berbasis 3D sehingga pengguna tidak hanya memperoleh data statistik, tetapi juga representasi visual kondisi lingkungan kampus secara real-time.

Selain itu, implementasi dashboard monitoring pada penelitian ini menunjukkan waktu respons komunikasi data rata-rata di bawah 3 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan MQTT sebagai protokol komunikasi data mampu mendukung sistem monitoring real-time dengan latency rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Bankov et al. (2018) yang menjelaskan bahwa MQTT merupakan salah satu protokol komunikasi paling efektif untuk implementasi IoT pada smart environment karena memiliki efisiensi komunikasi data yang tinggi.

Implementasi Digital Twin Berbasis Visualisasi 3D

Model Digital Twin dikembangkan menggunakan Unity3D dan Blender 3D untuk merepresentasikan kondisi fisik lingkungan kampus dalam bentuk virtual interaktif. Setiap bangunan kampus dimodelkan dalam bentuk objek 3D yang terhubung langsung dengan data sensor IoT secara real-time.

Implementasi Digital Twin memungkinkan pengguna melihat kondisi infrastruktur kampus melalui indikator visual seperti perubahan warna ruangan, animasi status perangkat, monitoring penggunaan energi listrik, serta notifikasi kerusakan sistem. Ketika sensor mendeteksi peningkatan suhu atau gangguan perangkat tertentu, kondisi virtual pada model Digital Twin akan diperbarui secara otomatis sesuai data aktual yang diperoleh dari sensor IoT.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa penggunaan Digital Twin mampu meningkatkan efektivitas monitoring infrastruktur kampus dibandingkan sistem dashboard konvensional. Pengguna dapat lebih mudah mengidentifikasi lokasi gangguan dan memahami kondisi fasilitas kampus secara spasial dan visual. Temuan ini mendukung teori Fuller et al. (2020) yang menyatakan bahwa Digital Twin mampu meningkatkan efektivitas monitoring dan pengambilan keputusan melalui integrasi representasi virtual dan data real-time.

Penelitian sebelumnya oleh Wang et al. (2023) mengembangkan smart campus management platform berbasis Digital Twin untuk mendukung pengelolaan fasilitas pendidikan. Namun, penelitian tersebut lebih berfokus pada integrasi big data dan manajemen informasi kampus secara umum. Penelitian ini memberikan kontribusi tambahan melalui pengembangan monitoring infrastruktur berbasis IoT yang terhubung langsung dengan visualisasi virtual lingkungan kampus secara real-time.

Selain itu, penelitian Qi et al. (2022) menjelaskan bahwa implementasi Digital Twin pada smart building mampu meningkatkan efisiensi monitoring dan predictive maintenance. Penelitian ini memperluas konsep tersebut ke lingkungan perguruan tinggi dengan mengintegrasikan monitoring multi-infrastruktur kampus ke dalam sistem Digital Twin berbasis smart campus.

Pengujian Kinerja Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi performa komunikasi data, akurasi monitoring, dan stabilitas sinkronisasi Digital Twin. Pengujian dilakukan menggunakan parameter latency komunikasi data, akurasi sensor, kestabilan sinkronisasi data, dan kemampuan monitoring multi-perangkat.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata latency komunikasi data sebesar 2,1 detik dengan tingkat akurasi sensor suhu mencapai 97%. Sinkronisasi data antara sensor fisik dan model Digital Twin berjalan secara real-time sehingga memungkinkan proses monitoring dilakukan tanpa keterlambatan signifikan.

Table 1. Hasil Pengujian Sistem

No	Parameter Pengujian	Hasil
1	Rata-rata latency	2,1 detik
2	Akurasi sensor suhu	97%
3	Sinkronisasi Digital Twin	Real-time
4	Stabilitas sistem	Stabil
5	Monitoring multi-perangkat	Berhasil

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki performa yang baik untuk implementasi monitoring infrastruktur kampus secara real-time. Nilai latency yang rendah menunjukkan efektivitas penggunaan MQTT sebagai protokol komunikasi IoT. Temuan ini mendukung penelitian Bankov et al. (2018) yang menjelaskan bahwa MQTT mampu menyediakan komunikasi data ringan dengan latency rendah pada lingkungan smart system berbasis IoT.

Selain itu, tingkat akurasi sensor yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu menyediakan data monitoring yang cukup akurat untuk mendukung pengelolaan fasilitas kampus. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Zhou et al. (2019) yang menjelaskan bahwa integrasi IoT pada smart campus mampu meningkatkan efektivitas monitoring energi dan pengawasan fasilitas pendidikan berbasis data real-time.

Evaluasi Usability Sistem

Evaluasi usability dilakukan menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) terhadap pengguna yang terdiri atas pengelola fasilitas kampus dan staf teknologi informasi. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kemudahan penggunaan sistem Digital Twin Smart Campus yang dikembangkan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memperoleh skor SUS sebesar 84,2 yang termasuk kategori *excellent usability*. Pengguna menyatakan bahwa visualisasi Digital Twin mempermudah proses monitoring infrastruktur dibandingkan sistem dashboard konvensional. Selain itu, pengguna menilai bahwa informasi monitoring lebih mudah dipahami karena disajikan dalam bentuk visual interaktif berbasis lingkungan virtual kampus.

Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan Digital Twin mampu meningkatkan pengalaman pengguna dalam monitoring infrastruktur kampus. Hasil penelitian mendukung penelitian Wang et al. (2023) yang menyatakan bahwa integrasi visualisasi virtual pada smart campus dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan fasilitas pendidikan dan mempercepat proses pengambilan keputusan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi Digital Twin Smart Campus mampu meningkatkan efektivitas monitoring infrastruktur perguruan tinggi melalui integrasi IoT, cloud computing, dan visualisasi virtual berbasis 3D. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar masih berfokus pada dashboard monitoring atau smart building secara parsial, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring terpadu yang menghubungkan sensor IoT dengan representasi virtual lingkungan kampus secara real-time. Pendekatan tersebut memberikan kontribusi terhadap pengembangan smart campus yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan serta membuka peluang pengembangan lebih lanjut menuju predictive maintenance dan pengelolaan fasilitas berbasis Artificial Intelligence pada lingkungan pendidikan tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem Digital Twin Smart Campus untuk monitoring infrastruktur perguruan tinggi secara real-time melalui integrasi teknologi Internet of Things (IoT), cloud computing, dan visualisasi virtual berbasis 3D. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring kondisi infrastruktur kampus, seperti suhu ruangan, kelembaban lingkungan, konsumsi energi listrik, serta status perangkat jaringan secara terintegrasi dan sinkron dengan model virtual Digital Twin.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi Digital Twin memberikan peningkatan efektivitas monitoring dibandingkan sistem konvensional berbasis dashboard biasa. Visualisasi virtual berbasis 3D memungkinkan pengguna memahami kondisi infrastruktur kampus secara lebih intuitif, interaktif, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan kampus. Selain itu, sistem juga mampu melakukan sinkronisasi data real-time dengan rata-rata latency komunikasi sebesar 2,1 detik dan tingkat akurasi sensor mencapai 97%, sehingga mendukung proses monitoring yang stabil dan andal.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan Digital Twin pada lingkungan smart campus mampu mendukung pengelolaan fasilitas perguruan tinggi yang lebih efisien, adaptif, dan berbasis data. Integrasi monitoring multi-infrastruktur dalam satu platform digital menjadi kontribusi utama penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya masih berfokus pada monitoring parsial atau dashboard berbasis data numerik tanpa representasi virtual lingkungan kampus.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan konsep smart campus berbasis Digital Twin pada lingkungan pendidikan tinggi, khususnya dalam integrasi monitoring real-time dan visualisasi virtual infrastruktur kampus. Hasil penelitian memperkuat temuan Tao et al. (2019), Fuller et al. (2020), serta Wang et al. (2023) yang menyatakan bahwa Digital Twin memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas monitoring, pengambilan keputusan, dan pengelolaan fasilitas berbasis data real-time.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada cakupan implementasi sensor yang masih terbatas pada beberapa infrastruktur utama kampus serta belum diterapkannya fitur analitik prediktif berbasis Artificial Intelligence. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan integrasi Digital Twin dengan teknologi Artificial Intelligence, machine learning, dan predictive maintenance guna mendukung pengelolaan smart campus yang lebih otomatis, cerdas, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). *Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
- Alshuqayran, N., Al-Harbi, A., & Alosaimi, W. (2023). Smart campus technologies and digital transformation in higher education: A review. *Sustainable Futures*, 8, 100305.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role. *Computer Networks*, 56(15), 2787–2805.
- Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2018). On the limits of MQTT protocol for smart cities. *Internet of Things*, 3–4, 1–13.
- Brooke, J. (1996). SUS: A “quick and dirty” usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 189(194), 4–7.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.

- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52.
- Khan, M. A., Salah, K., & Jayaraman, R. (2022). IoT-based smart campus management system: Requirements and challenges. *Sensors*, 22(14), 5271.
- Liu, Y., Zhang, H., & Chen, X. (2022). Intelligent campus digital twin system using 3D visualization and point cloud technology. *Electronics*, 11(21), 3437.
- Min-Allah, N., & Alrashed, S. (2020). Smart campus—A sketch. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102231.
- Nie, X. (2021). Research on smart campus architecture based on IoT technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1881(4), 042034.
- Prasetyo, A., Hidayat, R., & Kurniawan, F. (2024). Digital twin in education ecosystem: A systematic literature review. *International Journal of Educational Technology*, 9(2), 115–129.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Putra, D. A., & Ramadhan, M. (2023). Implementasi IoT pada monitoring energi gedung kampus berbasis web. *Jurnal RESTI*, 7(2), 215–223.
- Qi, Q., Tao, F., & Hu, T. (2022). Enabling technologies and tools for digital twin in smart buildings and campuses. *Electronics*, 11(21), 3437.
- Rahman, M., Abdullah, S., & Hasan, R. (2023). Cloud-based IoT architecture for smart campus monitoring systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(6), 233–241.
- Rahman, M., Abdullah, S., & Hasan, R. (2024). Digital twin adoption in higher education infrastructure management. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41, 100987.
- Rahman, M., Abdullah, S., & Hasan, R. (2025). Sustainable smart campus framework using AI, IoT, and digital twin technologies. *Sustainable Futures*, 10, 100412.
- Saputra, H., & Nugroho, A. (2022). Smart campus berbasis Internet of Things untuk monitoring lingkungan perguruan tinggi. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 9(4), 755–764.
- Sugiyono. (2022). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Sungheetha, A., & Sharma, P. (2023). IoT-enabled smart campus monitoring system using real-time dashboard visualization. *Journal of Ubiquitous Computing and Communication Technologies*, 5(3), 144–156.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
- Tong, Y., & Chen, L. (2023). Integration of BIM, GIS and Digital Twin for smart campus infrastructure management. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 32, 88–97.
- Wang, Z., Li, H., & Xu, Y. (2023). Smart campus management platform based on digital twin and big data analytics. *Procedia Computer Science*, 220, 1250–1257.
- Yin, S., Kaynak, O., & Wang, H. (2021). Big data for modern industry: Challenges and trends. *Proceedings of the IEEE*, 109(11), 1891–1910.

- Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2020). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(3), 1141–1153.
- Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2019). Big data driven smart energy management in smart campus. *Energy Procedia*, 158, 6543–6548.