

BAB 1

SPEKIFIKASI KEBUTUHAN PERANGKAT LUNAK

1.1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi digital mendorong transformasi pada berbagai sektor, termasuk bidang kesehatan, melalui penerapan sistem monitoring berbasis data waktu nyata (*real-time*). Salah satu teknologi yang berkembang adalah Internet of Things (IoT), yang memungkinkan perangkat fisik saling terhubung untuk melakukan pengumpulan, pengiriman, dan pengolahan data secara otomatis. Seiring dengan perkembangan tersebut, konsep *Digital Twin* juga mulai banyak diterapkan sebagai representasi virtual dari objek fisik yang terhubung dengan data aktual sehingga memungkinkan proses monitoring dan simulasi dilakukan secara lebih interaktif dan dinamis (Tao et al., 2019; Fuller et al., 2020).

Dalam lingkungan fasilitas kesehatan, ruang operasi merupakan area yang membutuhkan pengelolaan kondisi lingkungan secara terkontrol untuk mendukung efektivitas tindakan medis dan kenyamanan operasional. Parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan udara, pencahayaan, dan aktivitas di dalam ruangan perlu dipantau secara berkala agar kondisi ruang tetap berada pada rentang yang sesuai. Selain itu, penggunaan perangkat listrik seperti sistem pencahayaan dan pendingin ruangan secara terus-menerus berpotensi meningkatkan konsumsi energi apabila tidak dikelola dengan baik, terutama karena operasional fasilitas kesehatan berlangsung selama 24 jam (Biantoro, 2018; Eteruddin et al., 2021).

Penerapan sistem monitoring berbasis IoT pada ruang operasi dapat menjadi salah satu solusi untuk membantu pengawasan kondisi lingkungan secara otomatis. Data lingkungan yang diperoleh dari sensor dapat dimanfaatkan untuk mendukung pengambilan keputusan terhadap kondisi ruangan, seperti pengaturan pencahayaan, deteksi aktivitas ruangan, serta pengendalian perangkat pendukung berdasarkan kebutuhan operasional. Dengan pendekatan tersebut, sistem tidak hanya mendukung monitoring kondisi ruangan, tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan energi (*energy saving*).

Di sisi lain, perkembangan konsep *Digital Twin* membuka peluang untuk merepresentasikan kondisi fisik ruang operasi ke dalam bentuk visualisasi digital secara *real-time*. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada monitoring data sensor dan belum banyak mengintegrasikan miniatur fisik dengan visualisasi tiga

dimensi (3D) sebagai media simulasi interaktif, khususnya pada konteks ruang operasi berbasis IoT (Tao et al., 2019; Fuller et al., 2020).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi berbasis Internet of Things (IoT) dan Unity 3D sebagai studi awal (*preliminary study*) untuk membangun integrasi antara miniatur fisik dan representasi digital ruang operasi. Sistem memanfaatkan sensor lingkungan, mikrokontroler ESP32, serta komunikasi data berbasis *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) untuk mengirimkan data menuju visualisasi *Digital Twin* pada Unity 3D secara *real-time*. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi media simulasi pembelajaran mengenai integrasi sistem fisik dan digital berbasis IoT, sekaligus menjadi dasar pengembangan sistem ruang operasi digital yang lebih interaktif pada penelitian selanjutnya.

1.1.1 Siklus Hidup Pengembangan Sistem

Dalam pengembangan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi, metode pengembangan perangkat lunak yang digunakan adalah metode *Prototype*. Metode ini dipilih karena sistem yang dikembangkan memerlukan proses penyesuaian secara bertahap antara kebutuhan pengguna, perangkat keras berbasis sensor, serta visualisasi digital pada aplikasi Unity 3D.

Metode *Prototype* memungkinkan pengembang membuat rancangan awal sistem yang dapat langsung diuji dan dievaluasi oleh pengguna sebelum sistem dikembangkan secara penuh. Pendekatan ini sesuai dengan karakteristik penelitian yang mengintegrasikan beberapa komponen seperti sensor lingkungan, mikrokontroler ESP32, komunikasi data MQTT, serta simulasi Digital Twin berbasis Unity 3D. Selain itu, metode ini juga memudahkan proses pengembangan antarmuka dashboard monitoring dan mekanisme status ruangan agar sesuai dengan kebutuhan pengguna.

Pada tahap awal, dilakukan proses identifikasi kebutuhan sistem berdasarkan hasil wawancara dengan klien dan studi literatur terkait teknologi Internet of Things (IoT), Digital Twin, serta sistem monitoring lingkungan. Setelah kebutuhan sistem diperoleh, pengembang membuat rancangan awal prototipe miniatur ruang operasi beserta visualisasi digital pada Unity 3D.

Tahap berikutnya adalah proses implementasi prototipe yang meliputi integrasi sensor BME280 Environmental Sensor Module, PIR HC-SR501 Motion Sensor, dan LDR GL5528 Light Sensor Module dengan mikrokontroler ESP32. Data sensor kemudian dikirim menggunakan protokol MQTT dan divisualisasikan pada aplikasi Unity 3D

secara waktu nyata (*real-time*).

Setelah prototipe awal selesai dikembangkan, dilakukan proses pengujian dan evaluasi sistem. Pada tahap ini, pengguna dapat memberikan masukan terhadap mekanisme status ruangan, tampilan dashboard monitoring, maupun proses perubahan status otomatis berbasis sensor gerak. Hasil evaluasi tersebut digunakan sebagai dasar perbaikan dan pengembangan sistem pada tahap berikutnya.

Melalui metode *Prototype*, proses pengembangan sistem dapat dilakukan secara bertahap dan fleksibel sehingga sistem yang dihasilkan dapat lebih sesuai dengan kebutuhan pengguna serta tujuan penelitian yang dikembangkan sebagai penelitian tahap awal (*preliminary study*) dalam pengembangan simulasi Digital Twin ruang operasi berbasis Internet of Things (IoT).

1.1.2 Tujuan Penulisan Spesifikasi Kebutuhan Perangkat Lunak

Dokumen Spesifikasi Kebutuhan Perangkat Lunak (SKPL) ini disusun sebagai acuan dalam proses pengembangan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi berbasis Internet of Things (IoT) dan Unity 3D. Dokumen ini bertujuan untuk mendefinisikan kebutuhan sistem secara terstruktur, baik kebutuhan fungsional maupun nonfungsional, sehingga proses perancangan, implementasi, dan pengujian sistem dapat dilakukan secara sistematis.

Selain itu, dokumen SKPL ini juga digunakan untuk menjelaskan gambaran umum sistem yang dikembangkan, meliputi integrasi perangkat keras berbasis sensor, komunikasi data menggunakan protokol MQTT, serta visualisasi Digital Twin pada aplikasi Unity 3D. Dengan adanya dokumen ini, seluruh kebutuhan sistem dapat terdokumentasi dengan jelas sehingga memudahkan proses pengembangan dan evaluasi sistem.

Dokumen SKPL juga bertujuan untuk menjadi pedoman komunikasi antara tim pengembang dengan pihak pengguna atau klien terkait kebutuhan sistem yang akan dibangun. Melalui dokumen ini, kebutuhan sistem seperti mekanisme status ruangan, monitoring sensor lingkungan, visualisasi dashboard, serta perubahan status otomatis berbasis sensor gerak dapat dijelaskan secara rinci agar pengembangan sistem sesuai dengan tujuan penelitian.

Selain sebagai acuan pengembangan perangkat lunak, dokumen ini juga digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tahapan implementasi dan pengujian sistem pada laporan tugas akhir. Dengan demikian, seluruh proses pengembangan sistem dapat dilakukan secara lebih terarah, terdokumentasi, dan sesuai dengan kebutuhan penelitian

yang dikembangkan sebagai penelitian tahap awal (*preliminary study*) dalam pengembangan sistem Digital Twin ruang operasi berbasis Internet of Things (IoT).

1.1.3 Cakupan Produk

Pengembangan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dilakukan sebagai penelitian tahap awal (*preliminary study*) dalam pengembangan sistem simulasi ruang operasi berbasis Internet of Things (IoT) dan visualisasi tiga dimensi menggunakan Unity 3D. Sistem dikembangkan untuk mendukung proses pembelajaran mengenai integrasi antara sistem fisik berbasis sensor dengan representasi digital secara *real-time*, sehingga pengguna dapat memahami hubungan antara kondisi lingkungan fisik pada miniatur ruang operasi dengan visualisasi digital secara lebih interaktif dan terstruktur.

Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak laboratorium sebagai klien, proses pembelajaran mengenai Internet of Things (IoT) dan *Digital Twin* masih didominasi oleh pembacaan data sensor melalui *serial monitor* tanpa visualisasi yang representatif. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembelajaran integrasi perangkat keras dan perangkat lunak menjadi kurang interaktif karena pengguna hanya memperoleh informasi dalam bentuk data numerik tanpa memahami hubungan langsung antara kondisi fisik dan representasi digital sistem. Selain itu, belum tersedia media simulasi ruang operasi berbasis *Digital Twin* yang mampu menampilkan kondisi lingkungan ruangan secara dinamis melalui visualisasi tiga dimensi yang terhubung langsung dengan miniatur fisik. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dikembangkan untuk membangun sistem simulasi ruang operasi berbasis Digital Twin yang mampu merepresentasikan hubungan antara miniatur fisik dan sistem digital secara *real-time*. Sistem dikembangkan sebagai media pembelajaran interaktif yang memungkinkan pengguna memahami integrasi sensor lingkungan, komunikasi data, serta visualisasi digital dalam konsep Internet of Things (IoT).

Produk yang dikembangkan terdiri dari dua komponen utama, yaitu sistem fisik dan sistem digital. Sistem fisik berupa miniatur ruang operasi yang dilengkapi dengan sensor lingkungan untuk membaca kondisi suhu, kelembapan udara, intensitas cahaya, dan aktivitas di dalam ruangan. Seluruh data sensor diproses menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama sistem, kemudian dikirim menuju aplikasi Unity 3D menggunakan protokol komunikasi Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk divisualisasikan secara *real-time*.

Pada sisi sistem digital, aplikasi Unity 3D digunakan untuk menampilkan representasi *Digital Twin* ruang operasi dalam bentuk visualisasi tiga dimensi yang menyerupai miniatur fisik. Selain visualisasi ruangan, sistem juga menyediakan dashboard monitoring yang menampilkan kondisi lingkungan secara dinamis, seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, aktivitas ruangan, status penggunaan ruang operasi, serta mode ruang operasi yang dipilih pengguna.

Sistem dikembangkan dengan tiga kondisi utama status ruangan, yaitu Idle, Preparation, dan In-Use. Status tersebut dirancang untuk merepresentasikan kondisi penggunaan ruang operasi mulai dari kondisi tidak digunakan, tahap persiapan operasi, hingga simulasi operasi sedang berlangsung. Perubahan status dapat dilakukan secara manual melalui *push button* maupun otomatis berdasarkan aktivitas yang terdeteksi oleh sensor gerak (*motion sensor*). Mekanisme otomatis tersebut dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi serta membantu sistem mengelola kondisi ruangan secara lebih adaptif. Selain itu, sistem menyediakan pilihan mode ruang operasi berupa General Operating Room dan Ortho Operating Room yang memengaruhi tampilan visual simulasi pada Unity 3D. Penambahan mode tersebut bertujuan meningkatkan aspek interaktivitas dan visualisasi sistem sebagai media pembelajaran berbasis *Digital Twin*. Dengan adanya integrasi antara miniatur fisik, komunikasi data MQTT, dan visualisasi digital, sistem diharapkan dapat membantu pengguna memahami hubungan antara sistem fisik dan sistem digital dalam konsep Digital Twin berbasis Internet of Things (IoT) secara lebih mudah dan aplikatif.

Sebagai bagian dari institusi pendidikan berbasis Islam, pengembangan sistem ini juga memperhatikan nilai-nilai keislaman yang berkaitan dengan keselamatan, tanggung jawab, efisiensi penggunaan sumber daya, kerja sama, profesionalisme, dan kebermanfaatan ilmu pengetahuan. Integrasi nilai Islam tersebut menjadi landasan etika dalam pengembangan teknologi agar dapat memberikan manfaat yang baik bagi proses pendidikan maupun pengembangan ilmu pengetahuan.

Prinsip menjaga keselamatan manusia sebagaimana tercantum dalam Al-Qur'an menjadi salah satu nilai yang mendasari pengembangan sistem simulasi ruang operasi. Allah Swt. berfirman dalam QS. Al-Mā'idah ayat 32:

وَمِنْ أَجْلِ ذَٰلِكَ كَتَبْنَا عَلَىٰ بَنِي إِسْرَٰئِيلَ أَنَّهُ مَن قَتَلَ نَفْسًا بِغَيْرِ نَفْسٍ أَوْ فَسَادٍ فِي الْأَرْضِ
فَكَأَنَّمَا قَتَلَ النَّاسَ جَمِيعًا وَمَنْ أَحْيَاهَا فَكَأَنَّمَا أَحْيَا النَّاسَ جَمِيعًا وَلَقَدْ جَاءَتْهُمْ رُسُلُنَا
بِالْبَيِّنَاتِ ثُمَّ إِن كَثِيرًا مِّنْهُمْ بَعْدَ ذَٰلِكَ فِي الْأَرْضِ لَمُسْرِفُونَ

"Oleh karena itu Kami tetapkan (suatu hukum) bagi Bani Israil, bahwa barang siapa membunuh seseorang, bukan karena orang itu membunuh orang lain atau bukan karena berbuat kerusakan di bumi, maka seakan-akan dia telah membunuh semua manusia. Barang siapa memelihara kehidupan seorang manusia, maka seakan-akan dia telah memelihara kehidupan semua manusia..." (QS. Al-Mā'idah [5]: 32)

Ayat tersebut menunjukkan pentingnya menjaga keselamatan manusia. Dalam penelitian ini, prinsip tersebut diterapkan melalui pengembangan simulasi ruang operasi yang membantu monitoring kondisi lingkungan secara lebih terstruktur sebagai media pembelajaran pengelolaan ruang operasi.

Selain itu, Allah Swt. juga berfirman dalam QS. An-Nisā' ayat 58:

إِنَّ اللَّهَ يَأْمُرُكُمْ أَنْ تُؤَدُّوا الْأَمَانَاتِ إِلَىٰ أَهْلِهَا وَإِذَا حَكَمْتُمْ بَيْنَ النَّاسِ أَنْ تَحْكُمُوا بِالْعَدْلِ ۚ إِنَّ اللَّهَ نِعِمَّا يَعِظُكُمْ بِهِ ۗ إِنَّ اللَّهَ كَانَ سَمِيعًا بَصِيرًا

"Sesungguhnya Allah menyuruh kamu menyampaikan amanat kepada yang berhak menerimanya, dan apabila kamu menetapkan hukum di antara manusia hendaknya kamu menetapkannya dengan adil..." (QS. An-Nisā' [4]: 58)

Ayat tersebut menekankan pentingnya tanggung jawab dan amanah dalam pengelolaan suatu sistem. Nilai tersebut diterapkan melalui pengembangan sistem monitoring ruang operasi yang dirancang untuk membantu pengelolaan kondisi ruangan secara lebih teratur dan bertanggung jawab.

Dalam aspek efisiensi energi, Allah Swt. berfirman dalam QS. Al-Isrā' ayat 26–27:

وَأَتِ ذَا الْقُرْبَىٰ حَقَّهُ وَالْمِسْكِينَ وَابْنَ السَّبِيلِ وَلَا تَبْذِرْ تَبْذِيرًا ۖ إِنَّ الْمُبْذِرِينَ كَانُوا إِخْوَانَ الشَّيَاطِينِ ۖ وَكَانَ الشَّيْطَانُ لِرَبِّهِ كَفُورًا

"Dan berikanlah haknya kepada kerabat dekat, juga kepada orang miskin dan orang yang dalam perjalanan; dan janganlah kamu menghambur-hamburkan (hartamu) secara boros. Sesungguhnya orang-orang yang boros itu adalah saudara setan..." (QS. Al-Isrā' [17]: 26–27)

Ayat tersebut menjelaskan larangan melakukan pemborosan dalam penggunaan sumber daya. Dalam penelitian ini, prinsip tersebut diterapkan melalui mekanisme *energy saving* dengan pengendalian perangkat pencahayaan dan pendingin ruangan agar aktif sesuai kebutuhan penggunaan ruang operasi.

Sebagai media pembelajaran berbasis teknologi, penelitian ini juga sejalan dengan QS. Az-Zumar ayat 9:

قُلْ هَلْ يَسْتَوِي الَّذِينَ يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ ۚ إِنَّمَا يَتَذَكَّرُ أُولُو الْأَلْبَابِ

"Katakanlah: Apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui? Sesungguhnya hanya orang yang berakal sehat yang dapat menerima pelajaran." (QS. Az-Zumar [39]: 9)

Ayat tersebut menegaskan pentingnya ilmu pengetahuan dan pembelajaran. Pengembangan sistem *Digital Twin* berbasis IoT pada penelitian ini diharapkan dapat menjadi media pembelajaran interaktif yang membantu pengguna memahami integrasi antara sistem fisik dan sistem digital.

Nilai kerja sama dan saling membantu dalam kebaikan juga dijelaskan dalam QS. Al-Mā'idah ayat 2:

وَتَعَاوَنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ وَلَا تَعَاوَنُوا عَلَى الْإِثْمِ وَالْعُدْوَانِ ۚ وَاتَّقُوا اللَّهَ ۚ إِنَّ اللَّهَ شَدِيدُ الْعِقَابِ

"Dan tolong-menolonglah kamu dalam (mengerjakan) kebajikan dan takwa, dan jangan tolong-menolong dalam berbuat dosa dan permusuhan..." (QS. Al-Mā'idah [5]: 2)

Ayat tersebut menjadi landasan bahwa pengembangan teknologi sebaiknya dilakukan untuk memberikan manfaat dan mendukung proses pembelajaran secara positif melalui kolaborasi berbagai bidang ilmu.

Selain itu, Allah Swt. juga berfirman dalam QS. Al-Baqarah ayat 269:

يُؤْتِي الْحِكْمَةَ مَن يَشَاءُ ۚ وَمَن يُؤْتَ الْحِكْمَةَ فَقَدْ أُوتِيَ خَيْرًا كَثِيرًا ۚ وَمَا يَذَّكَّرُ إِلَّا أُولُو الْأَلْبَابِ

"Allah menganugerahkan hikmah kepada siapa yang Dia kehendaki. Barang siapa dianugerahi hikmah, sungguh dia telah dianugerahi karunia yang banyak..." (QS. Al-Baqarah [2]: 269)

Ayat tersebut menunjukkan bahwa ilmu pengetahuan dan kebijaksanaan merupakan karunia yang bernilai besar. Dalam penelitian ini, penerapan teknologi IoT dan *Digital Twin* diharapkan dapat memberikan manfaat dalam pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi secara lebih interaktif dan aplikatif.

Selain ayat Al-Qur'an, pengembangan sistem ini juga sejalan dengan beberapa hadits Rasulullah Saw. yang berkaitan dengan profesionalisme, tanggung jawab, dan kebermanfaatan ilmu pengetahuan. Rasulullah Saw. bersabda:

إِنَّ اللَّهَ يُحِبُّ إِذَا عَمِلَ أَحَدُكُمْ عَمَلًا أَنْ ي

“Sesungguhnya Allah mencintai seseorang yang apabila ia melakukan suatu pekerjaan, ia menyempurnakannya.” (HR. Thabrani)

Hadits tersebut menjadi landasan dalam proses pengembangan sistem yang dilakukan secara terstruktur mulai dari tahap analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, hingga pengujian.

Rasulullah Saw. juga bersabda:

خَيْرُ النَّاسِ أَنْفَعُهُمْ لِلنَّاسِ

“Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia lainnya.” (HR. Ahmad)

Hadits tersebut menunjukkan bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi sebaiknya dikembangkan untuk memberikan manfaat kepada masyarakat. Dalam penelitian ini, sistem dikembangkan sebagai media pembelajaran interaktif berbasis *Digital Twin* dan Internet of Things (IoT).

Selain itu, Rasulullah Saw. bersabda:

طَلَبُ الْعِلْمِ فَرِيضَةٌ عَلَى كُلِّ مُسْلِمٍ

“Mencari ilmu adalah kewajiban bagi setiap Muslim.” (HR. Ibnu Majah)

Hadits tersebut menjadi dasar bahwa pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi memiliki peran penting dalam mendukung proses pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Prinsip tanggung jawab dalam pengelolaan sistem juga dijelaskan dalam hadits Rasulullah Saw.:

كُلُّكُمْ رَاعٍ وَكُلُّكُمْ مَسْئُولٌ عَنْ رَعِيَّتِهِ

“Setiap kalian adalah pemimpin dan setiap kalian akan dimintai pertanggungjawaban atas yang dipimpinnya.”

(HR. Bukhari dan Muslim)

Hadits tersebut mengajarkan pentingnya tanggung jawab dalam pengelolaan suatu sistem maupun teknologi agar dapat digunakan secara baik dan sesuai tujuan penggunaannya.

Rasulullah Saw. juga bersabda:

مَنْ دَلَّ عَلَى خَيْرٍ فَلَهُ مِثْلُ أَجْرِ فَاعِلٍ

“Barang siapa menunjukkan kepada kebaikan, maka dia akan mendapatkan pahala seperti orang yang melakukannya.” (HR. Muslim)

Hadits tersebut menjadi motivasi bahwa pengembangan teknologi yang bermanfaat dan mendukung proses pembelajaran dapat memberikan nilai positif bagi pengguna maupun pengembang sistem.

Selain itu, Rasulullah Saw. bersabda:

الْمُؤْمِنُ الْقَوِيُّ خَيْرٌ وَأَحَبُّ إِلَى اللَّهِ مِنَ الْمُؤْمِنِ
الضَّعِيفِ

“Mukmin yang kuat lebih baik dan lebih dicintai Allah daripada mukmin yang lemah.” (HR. Muslim)

Hadits tersebut mengandung makna pentingnya mempersiapkan kemampuan dan kualitas diri secara optimal, termasuk dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang bermanfaat bagi masyarakat.

Dengan adanya integrasi antara miniatur fisik ruang operasi, sensor lingkungan, komunikasi data MQTT, dan visualisasi *Digital Twin* berbasis Unity 3D, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu menjadi media pembelajaran interaktif yang membantu pengguna memahami hubungan antara sistem fisik dan sistem digital dalam konsep *Digital Twin* berbasis *Internet of Things (IoT)* secara lebih mudah, aplikatif, dan terstruktur.

1.1.4 Definisi, Singkatan, dan Akronim

Berikut adalah definisi, singkatan, dan akronim dari beberapa istilah yang telah disebutkan:

Tabel 1. Definisi, Singkatan, dan Akronim

Akronim	Singkatan	Deskripsi
IoT	Internet of Things	Konsep jaringan perangkat yang saling terhubung melalui internet untuk mengirim dan menerima data secara otomatis menggunakan sensor dan perangkat komunikasi.

Akronim	Singkatan	Deskripsi
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	Protokol komunikasi ringan (<i>lightweight protocol</i>) yang digunakan untuk pertukaran data pada sistem Internet of Things (IoT).
ESP32	<i>Espressif System 32</i>	Mikrokontroler berbasis Wi-Fi dan Bluetooth yang digunakan sebagai pengendali utama sistem untuk membaca data sensor, mengontrol perangkat, dan mengirimkan data ke aplikasi Unity 3D.
BME280	Bosch Environmental Sensor 280	Sensor lingkungan yang digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan ruangan
PIR	<i>Passive Infrared Receiver</i>	Sensor gerak yang digunakan untuk mendeteksi aktivitas atau pergerakan di dalam ruangan.
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>	Sensor cahaya yang digunakan untuk membaca intensitas pencahayaan ruangan.
LED	<i>Light Emitting Diode</i>	Komponen elektronik yang menghasilkan cahaya dan digunakan sebagai simulasi pencahayaan serta indikator status ruangan.
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>	Teknologi jaringan nirkabel yang digunakan untuk komunikasi data pada sistem.
Digital Twin	-	Representasi digital dari suatu objek atau sistem fisik yang terhubung secara langsung dengan data aktual sehingga mampu menampilkan kondisi sistem secara dinamis dan <i>real-time</i> .

Akronim	Singkatan	Deskripsi
Unity 3D	-	Perangkat lunak pengembangan visualisasi dan simulasi tiga dimensi yang digunakan untuk menampilkan Digital Twin ruang operasi.
Dashboard Monitoring	-	Tampilan antarmuka pada aplikasi Unity 3D yang digunakan untuk menampilkan informasi kondisi Lingkungan ruangan secara <i>real-time</i> .
<i>Cooling Fan</i>	-	Kipas pendingin yang digunakan sebagai simulasi sistem pendingin ruangan pada miniatur ruang operasi.
<i>Push Button</i>	-	Tombol yang digunakan untuk mengubah status penggunaan ruang operasi secara manual.
<i>Real-Time</i>	-	Kondisi ketika data atau informasi dapat diproses dan ditampilkan secara langsung tanpa jeda waktu yang signifikan.
<i>Idle</i>	-	Kondisi ketika ruang operasi tidak digunakan sehingga seluruh sensor dan perangkat berada dalam kondisi nonaktif untuk menghemat energi.
<i>Preparation</i>	-	Kondisi persiapan ruang operasi ketika sensor cahaya aktif, sistem pencahayaan menyala, dan <i>cooling fan</i> berada dalam kondisi <i>standby</i> .
<i>In-Use</i>	-	Kondisi ketika ruang operasi sedang digunakan dan seluruh sensor serta perangkat aktif untuk memantau kondisi lingkungan ruangan.

Akronim	Singkatan	Deskripsi
<i>General Mode</i>	-	Mode simulasi ruang operasi umum yang digunakan pada aplikasi Unity 3D.
<i>Ortho Mode</i>	-	Mode simulasi ruang operasi ortopedi yang digunakan pada aplikasi Unity 3D.
<i>Preliminary Study</i>	-	Penelitian tahap awal yang dilakukan sebagai dasar pengembangan penelitian lanjutan yang lebih kompleks.

1.1.5 Deskripsi Umum Bab

Bab 1 membahas mengenai Spesifikasi Kebutuhan Perangkat Lunak pada sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi berbasis Internet of Things (IoT) dan Unity 3D. Bab ini disusun untuk menjelaskan kebutuhan sistem, ruang lingkup penelitian, serta gambaran umum perangkat lunak yang digunakan dalam pengembangan sistem simulasi ruang operasi berbasis *Digital Twin*.

1. Pendahuluan

Bagian ini menjelaskan latar belakang pengembangan sistem, tujuan penyusunan dokumen, cakupan produk, serta definisi istilah dan akronim yang digunakan pada penelitian.

2. Deskripsi Umum Perangkat Lunak

Bagian ini menjelaskan gambaran umum sistem, arsitektur perangkat lunak, serta mekanisme integrasi antara miniatur fisik ruang operasi dan visualisasi *Digital Twin* berbasis Unity 3D.

3. Kebutuhan Fungsional

Bagian ini menjelaskan kebutuhan fungsional yang harus dimiliki oleh sistem untuk mendukung proses monitoring, visualisasi, dan simulasi ruang operasi berbasis IoT.

4. Fitur Sistem

Bagian ini menjelaskan fitur utama yang tersedia pada sistem sebagai pendukung simulasi dan monitoring kondisi ruang operasi secara *real-time*.

5. Kebutuhan Non Fungsional

Bagian ini menjelaskan kebutuhan nonfungsional yang berkaitan dengan kualitas, performa, efisiensi, dan kemudahan penggunaan sistem.

1.2 Deskripsi Umum Perangkat Lunak

1.2.1 Perspektif Produk

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi merupakan sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan sebagai media pembelajaran interaktif mengenai integrasi antara sistem fisik berbasis sensor dengan visualisasi digital menggunakan Unity 3D. Sistem ini dikembangkan pada lingkungan Laboratorium Riset Software Engineering and Human Computer Interaction Fakultas Teknologi Informasi Universitas YARSI sebagai penelitian tahap awal (*preliminary study*) dalam pengembangan simulasi ruang operasi berbasis *Digital Twin*.

Sistem yang dikembangkan terdiri dari dua komponen utama, yaitu sistem fisik berupa miniatur ruang operasi dan sistem digital berupa visualisasi tiga dimensi pada aplikasi Unity 3D. Miniatur fisik dilengkapi dengan sensor lingkungan untuk membaca kondisi ruangan, sedangkan aplikasi Unity 3D digunakan untuk menampilkan representasi *Digital Twin* yang terhubung dengan kondisi aktual miniatur secara *real-time*.

Pada sistem yang dikembangkan, seluruh data sensor diproses menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama sistem. Data tersebut kemudian dikirimkan menuju aplikasi Unity 3D melalui protokol komunikasi Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk divisualisasikan dalam bentuk simulasi ruang operasi secara interaktif. Selain visualisasi tiga dimensi, sistem juga menyediakan dashboard monitoring yang digunakan untuk menampilkan informasi kondisi lingkungan ruangan secara dinamis.

Sistem dirancang untuk dapat beroperasi secara mandiri sebagai media simulasi dan pembelajaran tanpa terintegrasi langsung dengan sistem rumah sakit maupun sistem akademik universitas. Fokus utama pengembangan sistem adalah mendukung proses pembelajaran mengenai integrasi Internet of Things (IoT), komunikasi data *real-time*, dan konsep Digital Twin melalui representasi digital ruang operasi.

Sebagai pengembangan simulasi ruang operasi, sistem memiliki mekanisme pengelolaan status ruangan yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi penggunaan ruang operasi, mulai dari kondisi tidak digunakan, tahap persiapan, hingga simulasi operasi berlangsung. Selain itu, sistem juga menyediakan visualisasi mode ruang operasi yang bertujuan meningkatkan aspek interaktivitas dan representasi lingkungan simulasi.

Dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya masih berfokus pada monitoring sensor dan visualisasi data lingkungan secara sederhana, penelitian ini mengembangkan integrasi antara miniatur fisik dan visualisasi tiga dimensi berbasis Unity 3D yang mampu menampilkan kondisi ruangan secara lebih dinamis dan interaktif sebagai media pembelajaran berbasis *Digital Twin*.

1.2.2 Fungsi Produk

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dikembangkan sebagai media pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan visualisasi tiga dimensi menggunakan Unity 3D. Sistem ini berfungsi untuk membantu pengguna memahami integrasi antara sistem fisik berbasis sensor dengan representasi digital secara *real-time* melalui konsep Digital Twin.

Secara umum, fungsi utama sistem yang dikembangkan meliputi:

1. Monitoring kondisi lingkungan ruang operasi, yang mencakup pembacaan kondisi suhu, kelembapan, intensitas cahaya, dan aktivitas ruangan menggunakan sensor lingkungan pada miniatur fisik.
2. Pengiriman data secara *real-time*, yaitu proses komunikasi data dari perangkat IoT menuju aplikasi Unity 3D menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk mendukung sinkronisasi antara miniatur fisik dan representasi digital.
3. Visualisasi *Digital Twin* ruang operasi, yaitu menampilkan representasi digital ruang operasi berbasis tiga dimensi pada aplikasi Unity 3D yang terhubung dengan kondisi aktual miniatur fisik.
4. Monitoring kondisi sistem melalui dashboard, yang digunakan untuk menampilkan informasi lingkungan ruangan serta kondisi operasional sistem secara dinamis.
5. Pengelolaan status ruang operasi, yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi penggunaan ruang operasi mulai dari kondisi tidak digunakan, tahap persiapan, hingga simulasi operasi berlangsung.
6. Mekanisme otomatisasi sistem, yaitu pengelolaan perubahan kondisi tertentu berdasarkan aktivitas yang terdeteksi oleh sensor untuk mendukung efisiensi penggunaan energi dan simulasi sistem yang lebih adaptif.

7. Visualisasi mode ruang operasi, yang digunakan untuk memberikan representasi lingkungan ruang operasi sesuai kebutuhan simulasi pada aplikasi Unity 3D.

Melalui fungsi-fungsi tersebut, sistem diharapkan dapat membantu pengguna memahami konsep integrasi Internet of Things (IoT), komunikasi data *real-time*, monitoring sensor lingkungan, dan visualisasi Digital Twin dalam bentuk simulasi pembelajaran yang lebih interaktif dan representatif.

1.2.3 Kelas dan Karakteristik Pengguna

Sistem Simulasi *Real-Time Digital Twin* untuk Ruang Operasi digunakan oleh beberapa jenis pengguna yang memiliki karakteristik dan kebutuhan penggunaan yang berbeda. Pengguna sistem terdiri dari mahasiswa, dosen atau pembimbing laboratorium, tim pengembang sistem, serta pengguna umum yang memanfaatkan sistem sebagai media pembelajaran dan demonstrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Digital Twin*. Setiap pengguna memiliki peran, karakteristik, serta hak akses yang berbeda sesuai dengan kebutuhan penggunaan sistem.

Kelas dan karakteristik pengguna pada sistem Simulasi *Real-Time Digital Twin* untuk Ruang Operasi ditunjukkan pada **Tabel 2**. Tabel tersebut menjelaskan karakteristik masing-masing pengguna beserta hak akses yang diberikan dalam penggunaan sistem.

Tabel 2. Kelas dan Karakteristik Pengguna

Pengguna	Karakteristik	Hak Akses
Mahasiswa	Pengguna yang menggunakan sistem sebagai media pembelajaran, demonstrasi, dan simulasi teknologi ruang operasi berbasis IoT dan <i>Digital Twin</i> .	Mengakses dashboard monitoring, melihat visualisasi <i>Digital Twin</i> , melakukan simulasi penggunaan sistem, mengubah status ruangan, serta memilih mode ruang operasi sesuai kebutuhan pembelajaran.
Dosen/Pembimbing Laboratorium	Pengguna yang menggunakan sistem untuk kegiatan demonstrasi, evaluasi pembelajaran, serta validasi implementasi sistem.	Mengakses seluruh fitur monitoring, melakukan pengawasan simulasi, serta mengevaluasi sinkronisasi antara miniatur fisik dan

		visualisasi digital.
Tim Pengembang Sistem	Pengguna yang bertanggung jawab terhadap pengembangan, pengujian, pemeliharaan, dan integrasi sistem perangkat keras maupun perangkat lunak.	Mengakses seluruh fitur sistem, melakukan konfigurasi perangkat, pengelolaan komunikasi data, pengujian, <i>debugging</i> , serta pengembangan sistem.
Pengguna Umum	Pengguna yang memanfaatkan sistem sebagai media observasi, demonstrasi, atau pembelajaran umum terkait teknologi IoT dan <i>Digital Twin</i> .	Melihat visualisasi ruang operasi digital dan melakukan pengamatan terhadap simulasi sistem secara terbatas.

Berdasarkan pembagian kelas dan karakteristik pengguna tersebut, sistem diharapkan dapat mendukung proses pembelajaran, simulasi, demonstrasi, serta evaluasi implementasi teknologi Internet of Things (IoT) dan Digital Twin secara lebih interaktif dan terstruktur sesuai dengan kebutuhan masing-masing pengguna.

1.2.4 Lingkungan Operasi

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dioperasikan pada lingkungan Laboratorium Riset Software Engineering and Human Computer Interaction Fakultas Teknologi Informasi Universitas YARSI sebagai media pembelajaran dan simulasi mengenai integrasi Internet of Things (IoT), komunikasi data *real-time*, dan visualisasi Digital Twin berbasis Unity 3D.

Sistem terdiri atas dua komponen utama, yaitu perangkat keras berupa miniatur ruang operasi berbasis sensor dan perangkat lunak berupa aplikasi Unity 3D yang berjalan pada komputer atau laptop. Komunikasi data antara miniatur fisik dan sistem digital dilakukan menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) melalui jaringan lokal (*local network*) maupun koneksi internet yang stabil.

Aplikasi Unity 3D dan sistem monitoring dijalankan menggunakan perangkat komputer atau laptop dengan spesifikasi minimum sebagai berikut:

1. Perangkat Keras Komputer
 - Prosesor minimal Intel Core i5 atau setara
 - Memori (RAM) minimal 8 GB

- Penyimpanan minimal 512 GB
 - Koneksi Wi-Fi atau jaringan lokal yang stabil
2. Perangkat Lunak Pendukung
 - Sistem operasi Windows 10 atau versi yang lebih baru
 - Unity 3D versi 2022 atau versi kompatibel
 - Arduino IDE untuk proses pemrograman ESP32
 - MQTT Broker untuk komunikasi data *real-time* antarperangkat
 3. Perangkat Sistem IoT
 - Mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama sistem
 - Sensor lingkungan untuk membaca kondisi suhu, kelembapan, cahaya, dan aktivitas ruangan
 - Aktuator berupa sistem pencahayaan, indikator status, dan pendingin ruangan pada miniatur
 - Perangkat pengontrol status untuk mendukung simulasi operasional ruang operasi

Lingkungan operasi tersebut dirancang untuk mendukung proses simulasi dan pembelajaran secara interaktif, sehingga pengguna dapat memahami integrasi antara sistem fisik berbasis sensor dengan visualisasi digital berbasis Digital Twin secara *real-time*.

1.2.5 Batasan Perancangan dan Implementasi

Dalam proses pengembangan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi, terdapat beberapa batasan perancangan dan implementasi yang diterapkan agar pengembangan sistem tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Sistem dikembangkan dalam bentuk miniatur ruang operasi sebagai media simulasi dan pembelajaran, sehingga tidak digunakan secara langsung pada lingkungan rumah sakit atau ruang operasi nyata.
2. Sistem dikembangkan sebagai media pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan Digital Twin, sehingga berfokus pada simulasi integrasi antara sistem fisik dan sistem digital.
3. Sistem menggunakan komunikasi data berbasis Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk mendukung pertukaran data secara *real-time* antara miniatur fisik dan aplikasi Unity 3D.

4. Sistem hanya dapat berjalan apabila perangkat IoT dan aplikasi Unity 3D memiliki akses komunikasi MQTT yang aktif melalui jaringan lokal (*local network*) atau koneksi internet yang stabil.
5. Sistem hanya mendukung tiga kondisi utama status ruangan, yaitu Idle, Preparation, dan In-Use, sesuai kebutuhan simulasi ruang operasi pada penelitian ini.
6. Sistem hanya mendukung dua mode ruang operasi, yaitu General Operating Room dan Ortho Operating Room pada visualisasi Unity 3D.
7. Sistem menggunakan visualisasi berbasis Unity 3D sebagai media representasi *Digital Twin* ruang operasi dan belum mendukung platform visualisasi lain.
8. Sistem belum terintegrasi dengan database rumah sakit, Hospital Information System (HIS), maupun perangkat medis nyata yang digunakan pada lingkungan rumah sakit.
9. Sistem dikembangkan menggunakan Bahasa Inggris sebagai bahasa utama pada antarmuka dashboard monitoring dan visualisasi sistem.
10. Penelitian ini merupakan penelitian tahap awal (*preliminary study*), sehingga pengembangan sistem masih terbatas pada simulasi pembelajaran dan dapat dikembangkan lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

Dengan adanya batasan tersebut, diharapkan penelitian dapat tetap terfokus pada pengembangan simulasi ruang operasi berbasis Internet of Things (IoT) dan Digital Twin sesuai tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

1.2.6 Dokumentasi Pengguna

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dilengkapi dengan dokumentasi pengguna yang bertujuan membantu pengguna memahami mekanisme penggunaan sistem, proses pengoperasian perangkat, serta interaksi antara miniatur fisik dan visualisasi *Digital Twin* pada aplikasi Unity 3D. Dokumentasi tersebut disusun untuk mendukung proses pembelajaran, simulasi, serta penggunaan sistem secara lebih terstruktur.

Dokumentasi pengguna pada sistem meliputi beberapa aspek sebagai berikut:

1. Panduan penggunaan perangkat keras, yang mencakup informasi mengenai komponen utama sistem berbasis Internet of Things (IoT), termasuk sensor lingkungan, aktuator, dan mikrokontroler yang digunakan pada miniatur ruang operasi.

2. Panduan pengoperasian aplikasi Unity 3D, yang menjelaskan proses menjalankan sistem, membaca dashboard monitoring, serta memahami visualisasi *Digital Twin* ruang operasi secara *real-time*.
3. Panduan penggunaan status ruangan, yang menjelaskan mekanisme simulasi kondisi ruang operasi berdasarkan status operasional sistem.
4. Panduan penggunaan mode ruang operasi, yang menjelaskan fungsi mode simulasi yang tersedia pada aplikasi Unity 3D.
5. Dokumentasi instalasi dan konfigurasi sistem, yang mencakup proses instalasi perangkat lunak, konfigurasi komunikasi MQTT, dan pengaturan lingkungan sistem.
6. Dokumentasi pengujian sistem, yang berisi hasil pengujian terhadap komunikasi data, sinkronisasi sistem fisik dan digital, serta validasi fungsi sistem yang dikembangkan.

Dengan adanya dokumentasi pengguna tersebut, diharapkan sistem dapat digunakan secara lebih mudah oleh mahasiswa, dosen, maupun pengguna lain sebagai media pembelajaran Internet of Things (IoT) dan Digital Twin berbasis simulasi interaktif.

1.2.7 Asumsi dan Dependensi

Pengembangan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi memiliki beberapa asumsi dan dependensi yang digunakan sebagai dasar dalam proses implementasi dan pengoperasian sistem. Asumsi dan dependensi tersebut diperlukan agar sistem dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan dan rancangan yang telah ditentukan.

A. Asumsi Sistem

Adapun asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem diasumsikan digunakan pada lingkungan laboratorium atau ruang simulasi yang memiliki jaringan komunikasi yang stabil untuk mendukung pertukaran data secara *real-time*.
2. Pengguna sistem diasumsikan memiliki pemahaman dasar mengenai penggunaan komputer, konsep Internet of Things (IoT), serta pengoperasian aplikasi Unity 3D.
3. Miniatur ruang operasi diasumsikan telah dirakit dan dikonfigurasi dengan benar sehingga seluruh sensor dan aktuator dapat berfungsi sesuai rancangan sistem.
4. Seluruh sensor lingkungan dan perangkat pendukung diasumsikan dapat bekerja dengan baik selama proses simulasi dan pengujian berlangsung.

5. MQTT Broker diasumsikan berada dalam kondisi aktif sehingga komunikasi data antara perangkat IoT dan aplikasi Unity 3D dapat berjalan dengan baik.
6. Sistem diasumsikan digunakan sebagai media pembelajaran dan simulasi, sehingga tidak diterapkan secara langsung pada lingkungan rumah sakit atau ruang operasi nyata.
7. Aplikasi Unity 3D diasumsikan berjalan pada perangkat komputer atau laptop yang memiliki spesifikasi sesuai kebutuhan sistem.

B. Dependensi Sistem

Sistem memiliki beberapa dependensi yang memengaruhi proses operasional dan integrasi sistem, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem bergantung pada koneksi jaringan lokal (*local network*) atau internet untuk mendukung komunikasi data berbasis Message Queuing Telemetry Transport (MQTT).
2. Sistem bergantung pada perangkat ESP32 sebagai pengendali utama dalam proses pembacaan sensor dan pengendalian sistem.
3. Sistem bergantung pada MQTT Broker sebagai media komunikasi antara miniatur fisik dan aplikasi Unity 3D.
4. Sistem bergantung pada aplikasi Unity 3D untuk menampilkan visualisasi *Digital Twin* dan dashboard monitoring secara *real-time*.
5. Sistem bergantung pada sensor lingkungan dan aktuator yang digunakan pada miniatur ruang operasi agar simulasi dapat berjalan sesuai rancangan.
6. Sistem bergantung pada perangkat lunak pendukung seperti Arduino IDE untuk proses pemrograman dan konfigurasi perangkat IoT.
7. Sistem bergantung pada sumber daya listrik dan koneksi komunikasi yang stabil agar proses monitoring dan sinkronisasi sistem dapat berjalan secara optimal.

Dengan adanya asumsi dan dependensi tersebut, diharapkan sistem dapat beroperasi sesuai dengan kebutuhan simulasi pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan Digital Twin yang telah dirancang.

1.3 Kebutuhan Fungsional

Bagian ini menjelaskan kebutuhan fungsional sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi yang diperoleh berdasarkan hasil wawancara dengan klien serta proses analisis kebutuhan sistem. Kebutuhan fungsional disusun untuk menggambarkan fungsi utama yang harus dimiliki oleh sistem dalam mendukung proses simulasi,

monitoring kondisi lingkungan, serta visualisasi *Digital Twin* berbasis Internet of Things (IoT) dan Unity 3D secara *real-time*.

A. Data dan Informasi yang Dibutuhkan

- Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi memerlukan beberapa jenis data dan informasi untuk mendukung implementasi fungsi sistem. Data dan informasi tersebut meliputi:
- Data kondisi lingkungan ruangan, yang digunakan untuk mendukung proses monitoring kondisi ruang operasi secara *real-time*.
- Data aktivitas ruangan, yang digunakan untuk merepresentasikan keberadaan aktivitas pada ruang operasi sebagai bagian dari mekanisme simulasi sistem.
- Data status ruangan, yang digunakan untuk menentukan kondisi operasional sistem berdasarkan tahapan simulasi ruang operasi.
- Data mode ruang operasi, yang digunakan untuk menentukan representasi visual simulasi sesuai kebutuhan pembelajaran.
- Data komunikasi sistem, yang digunakan untuk mendukung proses pertukaran data secara *real-time* antara miniatur fisik dan aplikasi visualisasi.
- Data visualisasi *Digital Twin*, yang digunakan untuk menampilkan representasi digital miniatur ruang operasi pada aplikasi Unity 3D secara dinamis.

B. Pihak Berkepentingan (*Stakeholders*)

- Berikut pihak-pihak yang terlibat, terpengaruh, maupun menggunakan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi:
- Kepala Laboratorium Riset Software Engineering and Human Computer Interaction, yang berperan sebagai klien dan pemberi arahan utama dalam pengembangan sistem.
- Dosen dan pembimbing laboratorium, yang menggunakan sistem sebagai media pembelajaran dan evaluasi implementasi teknologi Internet of Things (IoT) dan *Digital Twin*.
- Mahasiswa, yang menggunakan sistem sebagai media pembelajaran interaktif mengenai integrasi sensor, komunikasi data, dan visualisasi digital.

- Tim pengembang sistem, yang bertanggung jawab terhadap proses perancangan, implementasi, pengujian, dan pengembangan sistem.
- Pengguna umum, yang menggunakan sistem sebagai media demonstrasi dan pengenalan konsep *Digital Twin* berbasis Internet of Things (IoT).

C. Dokumen Sumber Data dan Informasi

Dokumen yang digunakan sebagai sumber data dan informasi dalam pengembangan sistem meliputi:

- Dokumen hasil wawancara dengan klien mengenai kebutuhan sistem.
- Dokumen kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem.
- Dokumentasi miniatur ruang operasi dan integrasi sistem.
- Dokumentasi komunikasi data dan visualisasi *Digital Twin*.
- Referensi penelitian terkait **Internet of Things (IoT)**, monitoring lingkungan, dan *Digital Twin*.
- Dokumentasi hasil pengujian sistem dan perangkat pendukung.

D. Narasumber dan Justifikasi Pemilihan

Tabel 3 Narasumber dan Justifikasi Pemilihan

Narasumber	Jabatan/Posisi	Justifikasi
Nurmaya, S.Kom., M.Eng., Ph.D.	Kepala Laboratorium Riset <i>Software Engineering and Human Computer Interaction</i> Fakultas Teknologi Informasi Universitas YARSI	Sebagai klien dan pemberi arahan utama dalam pengembangan sistem, narasumber memiliki kewenangan dalam menentukan kebutuhan sistem, mekanisme simulasi, integrasi sensor lingkungan, visualisasi <i>Digital Twin</i> , serta pengembangan media pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan Unity 3D.

1.3.1 Antarmuka Pengguna

Pengguna berinteraksi dengan sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi melalui antarmuka berbasis visualisasi tiga dimensi menggunakan Unity 3D yang dilengkapi dengan *Graphical User Interface (GUI)*. Antarmuka sistem dirancang untuk menampilkan kondisi miniatur ruang operasi secara *real-time* melalui dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin* yang interaktif.

Antarmuka pengguna dirancang agar mampu memberikan informasi kondisi sistem secara mudah dipahami melalui kombinasi elemen visual, panel informasi, indikator status, serta representasi tiga dimensi ruang operasi. Informasi yang ditampilkan meliputi kondisi lingkungan ruangan, status operasional sistem, mode simulasi ruang operasi, serta kondisi perangkat yang terintegrasi pada miniatur fisik.

Dashboard monitoring digunakan untuk membantu pengguna memahami perubahan kondisi sistem secara dinamis. Selain itu, visualisasi *Digital Twin* pada Unity 3D dirancang untuk merepresentasikan hubungan antara sistem fisik dan sistem digital secara langsung, sehingga pengguna dapat melihat perubahan kondisi miniatur ruang operasi secara *real-time*.

Interaksi pengguna terhadap sistem dilakukan menggunakan perangkat input berupa keyboard dan mouse pada aplikasi Unity 3D, serta perangkat kontrol fisik berupa push button pada miniatur ruang operasi. Melalui antarmuka tersebut, pengguna dapat melakukan simulasi penggunaan ruang operasi, mengamati perubahan kondisi sistem, serta memahami integrasi antara sensor lingkungan, komunikasi data, dan visualisasi digital.

Komponen utama antarmuka sistem meliputi dashboard monitoring, panel informasi sistem, indikator status ruangan, visualisasi tiga dimensi ruang operasi, serta elemen pendukung yang membantu proses simulasi dan monitoring sistem secara interaktif.

Antarmuka Unity 3D dirancang agar dapat berjalan pada perangkat komputer atau laptop di lingkungan laboratorium dengan tampilan yang konsisten, mudah dipahami, dan mendukung proses pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan *Digital Twin*.

Dengan adanya antarmuka pengguna tersebut, sistem diharapkan mampu memberikan pengalaman pembelajaran yang lebih interaktif dalam memahami integrasi antara sistem fisik berbasis sensor dan representasi digital berbasis *Digital Twin* secara *real-time*.

1.3.2 Antarmuka Perangkat Keras

Sistem Simulasi *Real-Time Digital Twin* untuk Ruang Operasi memerlukan antarmuka perangkat keras yang mendukung proses monitoring kondisi lingkungan, pengendalian perangkat, serta visualisasi *Digital Twin* secara *real-time*. Antarmuka perangkat keras terdiri atas perangkat utama untuk menjalankan aplikasi sistem dan perangkat pendukung berbasis *Internet of Things* (IoT) yang digunakan pada miniatur ruang operasi.

Perangkat utama yang digunakan untuk menjalankan aplikasi **Unity 3D** dan *dashboard monitoring* berupa komputer atau laptop dengan spesifikasi minimum yang mampu mendukung proses visualisasi tiga dimensi secara optimal. Spesifikasi perangkat perlu diperhatikan agar proses simulasi, visualisasi model tiga dimensi, komunikasi data *real-time*, serta sinkronisasi antara sistem fisik dan sistem digital dapat berjalan dengan baik tanpa mengalami hambatan performa.

Selain perangkat utama, sistem juga menggunakan miniatur ruang operasi berbasis IoT yang terdiri atas mikrokontroler, sensor lingkungan, perangkat indikator, sistem pendingin simulasi, serta perangkat kontrol status ruangan. Komponen-komponen tersebut digunakan untuk mendukung proses simulasi kondisi ruang operasi secara interaktif. Seluruh komponen perangkat keras dirancang agar dapat terhubung secara terintegrasi melalui mikrokontroler sebagai pusat pengendali sistem, sehingga proses pembacaan kondisi lingkungan, pengendalian perangkat, serta perubahan status ruangan dapat dilakukan secara otomatis maupun manual sesuai kebutuhan simulasi.

Seluruh kondisi perangkat keras pada miniatur ruang operasi direpresentasikan ke dalam visualisasi *Digital Twin* pada aplikasi Unity 3D melalui mekanisme komunikasi data *real-time*. Dengan demikian, perubahan kondisi fisik pada miniatur dapat divisualisasikan secara sinkron pada sistem digital sehingga pengguna dapat memahami hubungan antara perangkat fisik dan representasi virtual secara lebih interaktif.

Kebutuhan minimum perangkat keras yang digunakan untuk menjalankan aplikasi sistem Simulasi *Real-Time Digital Twin* untuk Ruang Operasi ditunjukkan pada **Tabel 4**. Tabel tersebut menjelaskan spesifikasi minimum perangkat keras yang diperlukan agar aplikasi Unity 3D dan sistem monitoring dapat berjalan secara optimal.

Tabel 4 Kebutuhan Minimum Perangkat Keras

Komponen	Spesifikasi Minimum
Prosesor	Intel Core i5 / AMD Ryzen 5 atau setara

Komponen	Spesifikasi Minimum
RAM	Minimal 8 GB
Penyimpanan	Minimal 512 GB
Kartu Grafis	Mendukung Unity 3D dan DirectX 11 atau lebih tinggi
Monitor	Resolusi minimal 1280 × 720
Perangkat Input	Keyboard dan Mouse
Koneksi	Wi-Fi atau jaringan lokal (<i>local network</i>) yang stabil

1.3.3 Antarmuka Perangkat Lunak

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi memerlukan beberapa perangkat lunak yang saling terintegrasi untuk mendukung proses monitoring, komunikasi data, dan visualisasi *Digital Twin* secara *real-time*. Antarmuka perangkat lunak dirancang agar mendukung sinkronisasi antara miniatur fisik ruang operasi dengan representasi digital berbasis Unity 3D.

Perangkat lunak utama yang digunakan pada sistem terdiri atas Unity 3D, Arduino IDE, MQTT Broker, dan sistem operasi Windows sebagai lingkungan operasional utama. Masing-masing perangkat lunak memiliki fungsi yang saling mendukung dalam proses pengembangan maupun pengoperasian sistem.

Unity 3D digunakan sebagai platform utama untuk membangun visualisasi *Digital Twin* ruang operasi berbasis tiga dimensi. Aplikasi ini digunakan untuk menampilkan dashboard monitoring, representasi kondisi miniatur ruang operasi, serta simulasi perubahan kondisi sistem secara *real-time*.

Arduino IDE digunakan sebagai perangkat lunak pendukung dalam proses pemrograman dan konfigurasi mikrokontroler pada sistem IoT. Perangkat lunak ini digunakan selama tahap pengembangan dan pengujian sistem.

MQTT Broker digunakan sebagai media komunikasi data untuk mendukung proses pertukaran informasi antara miniatur fisik dan aplikasi Unity 3D secara *real-time*. Mekanisme komunikasi tersebut memungkinkan sinkronisasi kondisi sistem fisik dan sistem digital berjalan secara dinamis.

Sistem dijalankan pada lingkungan sistem operasi Windows yang mendukung integrasi perangkat lunak pengembangan, komunikasi data, serta visualisasi sistem secara optimal. Hubungan antar perangkat lunak pada sistem dirancang agar dapat mendukung proses monitoring dan simulasi secara terintegrasi. Data yang diperoleh dari miniatur fisik diproses dan dikirim melalui mekanisme komunikasi sistem, kemudian divisualisasikan pada aplikasi Unity 3D untuk memberikan representasi kondisi ruang operasi secara langsung.

Dengan adanya antarmuka perangkat lunak tersebut, sistem diharapkan mampu mendukung proses simulasi dan pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan *Digital Twin* secara lebih interaktif dan representatif.

1.3.4 Antarmuka Komunikasi

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi menggunakan mekanisme komunikasi data berbasis protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk mendukung proses pertukaran data secara *real-time* antara miniatur fisik dan aplikasi visualisasi berbasis Unity 3D.

Antarmuka komunikasi pada sistem dirancang untuk mendukung sinkronisasi kondisi antara sistem fisik dan sistem digital melalui mekanisme pertukaran data yang berlangsung secara berkelanjutan. Proses komunikasi dilakukan melalui jaringan lokal (*local network*) atau koneksi internet yang stabil untuk memastikan pengiriman data dapat berlangsung dengan baik.

Pada mekanisme komunikasi sistem, perangkat ESP32 berperan sebagai pengirim data (*publisher*) yang mengirimkan informasi kondisi sistem menuju MQTT Broker. Selanjutnya, aplikasi Unity 3D berperan sebagai penerima data (*subscriber*) yang menerima informasi tersebut untuk divisualisasikan ke dalam bentuk *Digital Twin* ruang operasi secara *real-time*.

Selain pengiriman data kondisi lingkungan, antarmuka komunikasi juga mendukung proses sinkronisasi status operasional sistem dan representasi kondisi perangkat pada visualisasi digital. Dengan mekanisme tersebut, perubahan kondisi pada miniatur fisik dapat ditampilkan secara langsung pada aplikasi Unity 3D tanpa memerlukan proses pembaruan (*refresh*) secara manual.

Secara umum, antarmuka komunikasi sistem menggunakan model publisher–subscriber untuk mendukung pertukaran data yang ringan, cepat, dan efisien sesuai kebutuhan sistem berbasis Internet of Things (IoT).

Dengan adanya antarmuka komunikasi tersebut, sistem diharapkan mampu mendukung proses simulasi dan pembelajaran berbasis *Digital Twin* secara interaktif melalui sinkronisasi kondisi miniatur fisik dan visualisasi digital secara *real-time*.

1.4 Fitur Sistem

1.4.1 Fitur Monitoring Suhu dan Kelembapan Ruangan

1.4.1.1 Deskripsi

Fitur Monitoring Suhu dan Kelembapan digunakan untuk membaca dan menampilkan kondisi termal miniatur ruang operasi secara *real-time*. Informasi suhu dan kelembapan digunakan untuk mendukung simulasi kondisi lingkungan ruang operasi serta membantu proses pengelolaan perangkat pendukung pada sistem.

Data kondisi lingkungan diperoleh dari sensor yang terintegrasi pada miniatur fisik dan dikirim menuju aplikasi Unity 3D melalui komunikasi MQTT untuk ditampilkan pada dashboard monitoring.

1.4.1.2 Trigger

Fitur Monitoring Suhu dan Kelembapan pada sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dijalankan melalui dua mekanisme, yaitu pemantauan otomatis (automatic monitoring) dan interaksi pengguna melalui dashboard monitoring.

1. Pemantauan Otomatis (Automatic Monitoring)

Sistem secara otomatis melakukan pembacaan data suhu dan kelembapan ruangan menggunakan sensor BME280 secara berkala tanpa memerlukan intervensi pengguna. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32, kemudian dikirimkan menuju MQTT Broker menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Selanjutnya, data diteruskan ke aplikasi Unity 3D untuk memperbarui dashboard monitoring dan visualisasi Digital Twin secara *real-time*.

2. Interaksi Pengguna Melalui Dashboard Monitoring

Pengguna dapat membuka halaman Dashboard Monitoring pada aplikasi Unity 3D untuk melihat informasi kondisi lingkungan ruang operasi yang diperbarui secara otomatis oleh sistem. Dashboard menampilkan data suhu, kelembapan, status ruang operasi, serta kondisi perangkat berdasarkan data terbaru yang diterima melalui MQTT. Dengan mekanisme tersebut, pengguna dapat memantau kondisi ruang operasi secara langsung tanpa perlu melakukan proses pembaruan (*refresh*) secara manual.

1.4.1.3 Input

Data masukan meliputi:

- Data suhu ruangan
- Data kelembapan ruangan
- Data komunikasi MQTT
- Aksi pengguna dalam menjalankan dashboard monitoring

1.4.1.4 Output

Luaran yang dihasilkan:

- Informasi suhu ruangan secara *real-time*
- Informasi kelembapan ruangan secara *real-time*
- Sinkronisasi data pada dashboard monitoring dan visualisasi sistem

1.4.1.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Sistem monitoring aktif
- MQTT Broker berjalan dengan baik

Pascakondisi:

- Data suhu dan kelembapan berhasil ditampilkan

Langkah-langkah:

1. Sensor membaca kondisi lingkungan.
2. Sistem memproses data pembacaan sensor.
3. Data dikirim menuju MQTT Broker.
4. Unity 3D menerima data monitoring.
5. Dashboard monitoring diperbarui secara otomatis.

1.4.1.6 Skenario Eksepsional

Sensor Tidak Dapat Dibaca

1. Sistem gagal memperoleh data sensor.
2. Dashboard monitoring tidak menerima pembaruan data terbaru.
3. Sistem mempertahankan data sebelumnya.

1.4.2 Fitur Monitoring Intensitas Cahaya Ruangan

1.4.2.1 Deskripsi

Fitur Monitoring Intensitas Cahaya digunakan untuk membaca kondisi pencahayaan miniatur ruang operasi sebagai bagian dari mekanisme simulasi operasional sistem. Informasi pencahayaan digunakan untuk mendukung representasi kondisi ruang operasi dan proses perubahan status sistem.

Data intensitas cahaya diperoleh dari sensor pada miniatur fisik dan ditampilkan secara *real-time* pada dashboard monitoring Unity 3D.

1.4.2.2 Trigger

Fitur dieksekusi secara otomatis ketika sistem membaca perubahan kondisi pencahayaan ruangan.

1.4.2.3 Input

Data masukan meliputi:

- Data intensitas cahaya ruangan
- Data komunikasi MQTT

1.4.2.4 Output

Luaran yang dihasilkan:

- Informasi kondisi pencahayaan ruangan
- Sinkronisasi kondisi pencahayaan pada dashboard monitoring

1.4.2.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Sistem monitoring aktif

Pascakondisi:

- Kondisi pencahayaan berhasil diperbarui

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca kondisi pencahayaan.
2. Data diproses oleh sistem.
3. Data dikirim menuju Unity 3D melalui MQTT.
4. Dashboard monitoring diperbarui secara otomatis.

1.4.2.6 Skenario Eksepsional

Gangguan Pembacaan Sensor

1. Sistem gagal membaca kondisi pencahayaan.
2. Dashboard tidak menerima pembaruan terbaru.
3. Sistem mempertahankan kondisi sebelumnya.

1.4.3 Fitur Deteksi Pergerakan Ruangan

1.4.3.1 Deskripsi

Fitur **Monitoring Aktivitas Ruangan** digunakan untuk mendeteksi adanya aktivitas pada miniatur ruang operasi sebagai bagian dari mekanisme simulasi operasional sistem. Informasi aktivitas digunakan untuk membantu proses otomatisasi status ruang operasi dan representasi kondisi simulasi secara *real-time*.

Data aktivitas diperoleh dari sensor yang terintegrasi pada miniatur fisik dan dikirim menuju Unity 3D melalui komunikasi MQTT.

1.4.3.2 Trigger

Fitur dieksekusi secara otomatis ketika sistem mendeteksi perubahan aktivitas pada miniatur ruang operasi.

1.4.3.3 Input

Data masukan meliputi:

- Data aktivitas ruangan
- Data komunikasi MQTT

1.4.3.4 Output

Luaran yang dihasilkan:

- Informasi aktivitas ruangan secara *real-time*
- Sinkronisasi kondisi aktivitas pada dashboard monitoring
- Dukungan perubahan status operasional sistem

1.4.3.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Sistem monitoring aktif

Pascakondisi:

- Aktivitas ruangan berhasil terdeteksi

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca aktivitas ruangan.
2. Data aktivitas diproses.
3. Sistem mengirimkan data menuju Unity 3D.
4. Dashboard monitoring diperbarui secara otomatis.
5. Sistem melakukan evaluasi logika status operasional.

1.4.3.6 Skenario Eksepsional**Aktivitas Tidak Terdeteksi**

1. Sistem tidak mendeteksi aktivitas ruangan.
2. Data aktivitas tidak diperbarui.
3. Sistem mempertahankan kondisi sebelumnya.

1.4.4 Fitur Pengaturan Status Ruangan**1.4.4.1 Deskripsi**

Fitur Pengaturan Status Ruangan digunakan untuk mengelola kondisi operasional ruang operasi pada sistem simulasi *Digital Twin*. Fitur ini memungkinkan sistem merepresentasikan tahapan penggunaan ruang operasi melalui perubahan status operasional yang berlangsung secara dinamis sesuai kondisi simulasi.

Status ruangan digunakan sebagai indikator kondisi operasional sistem dan memengaruhi representasi visual ruang operasi, kondisi perangkat pendukung, serta mekanisme simulasi yang berjalan pada aplikasi Unity 3D. Pengaturan status dapat dilakukan secara otomatis melalui logika sistem maupun melalui kontrol manual pada miniatur ruang operasi.

1.4.4.2 Trigger

Fitur Pengaturan Status Ruang Operasi dijalankan berdasarkan perubahan kondisi sistem dan interaksi pengguna. Sistem memiliki tiga status utama, yaitu IDLE, PREPARATION, dan IN USE, yang perubahan statusnya dikendalikan melalui logika sistem pada ESP32.

1. Pemicu Otomatis Sistem (Automatic Trigger)

Perubahan status dapat terjadi secara otomatis berdasarkan deteksi aktivitas ruang operasi menggunakan sensor PIR HC-SR501. Ketika aktivitas terdeteksi pada kondisi IDLE, sistem akan mengubah status menjadi PREPARATION. Selain itu, sistem akan kembali ke kondisi IDLE secara otomatis apabila tidak terdapat aktivitas dalam waktu tertentu (Auto IDLE).

2. Interaksi Pengguna (User Interaction)

Pengguna dapat mengubah status ruang operasi melalui aplikasi Unity 3D Dashboard. Pengguna memilih jenis operasi dan menjalankan perintah Start Surgery untuk mengubah status dari PREPARATION menjadi IN USE. Setelah operasi selesai, pengguna dapat memilih Finish Operation untuk mengembalikan sistem ke kondisi IDLE.

1.4.4.3 Input

Data masukan yang digunakan meliputi:

Data kondisi sistem:

- Data aktivitas ruangan
- Data kondisi pencahayaan
- Data status operasional sebelumnya
- Data logika sistem dan *timer*

Aksi pengguna:

- Perubahan status secara manual
- Reset simulasi sistem

1.4.4.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Pengaturan Status Ruangan meliputi:

- Perubahan status operasional ruang operasi
- Sinkronisasi status pada dashboard monitoring
- Pembaruan visualisasi *Digital Twin* secara *real-time*
- Penyesuaian kondisi perangkat simulasi berdasarkan status sistem

1.4.4.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Sistem monitoring aktif
- MQTT Broker berjalan dengan baik
- Unity 3D terhubung dengan sistem

Pascakondisi:

- Status ruang operasi berhasil diperbarui

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca kondisi simulasi ruang operasi.
2. Sistem mengevaluasi kondisi berdasarkan logika yang telah ditentukan.
3. Sistem menentukan perubahan status operasional.

4. Data status dikirim melalui MQTT.
5. Unity 3D menerima pembaruan data.
6. Dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin* diperbarui secara otomatis.

1.4.4.6 Skenario Eksepsional 1

Perubahan Status Tidak Valid

Prakondisi:

- Kondisi sistem tidak memenuhi syarat perubahan status

Pascakondisi:

- Sistem mempertahankan status sebelumnya

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca perubahan kondisi.
2. Sistem melakukan validasi logika perubahan status.
3. Perubahan status ditolak.
4. Sistem mempertahankan status operasional sebelumnya.

1.4.4.7 Skenario Eksepsional 2

Gangguan Komunikasi Sistem

Prakondisi:

- MQTT Broker tidak aktif atau jaringan terganggu

Pascakondisi:

- Visualisasi tidak menerima pembaruan terbaru

Langkah-langkah:

1. Sistem mencoba mengirim data perubahan status.
2. Komunikasi gagal dilakukan.
3. Unity 3D tidak menerima data terbaru.
4. Sistem mencoba melakukan komunikasi ulang secara otomatis.

1.4.5 Fitur Dashboard Monitoring Digital Twin

1.4.5.1 Deskripsi

Fitur Dashboard Monitoring Digital Twin digunakan untuk menampilkan informasi kondisi miniatur ruang operasi secara *real-time* pada aplikasi Unity 3D. Dashboard monitoring berfungsi sebagai media pemantauan kondisi sistem dengan menampilkan informasi sensor lingkungan, status ruangan, mode ruang operasi, serta kondisi perangkat yang digunakan pada sistem.

Fitur ini membantu pengguna memahami perubahan kondisi ruang operasi secara interaktif melalui tampilan informasi yang diperbarui secara otomatis berdasarkan data yang diterima dari ESP32 melalui komunikasi MQTT. Dashboard monitoring dirancang untuk memberikan informasi yang mudah dipahami selama proses simulasi berlangsung.

1.4.5.2 *Trigger*

- Fitur Dashboard Monitoring Digital Twin dieksekusi pada kondisi berikut:
- Manual (menjalankan dashboard monitoring)
Pengguna menjalankan aplikasi Unity 3D untuk melihat dashboard monitoring ruang operasi.
- Otomatis (*real-time monitoring*)
ESP32 mengirimkan data sensor dan status ruangan melalui MQTT sehingga dashboard monitoring memperbarui informasi secara otomatis.
- Manual (perubahan mode ruang operasi)
Pengguna memilih mode ruang operasi pada aplikasi Unity 3D.

1.4.5.3 *Input*

Data masukan yang digunakan pada fitur Dashboard Monitoring Digital Twin meliputi:

Data sensor:

- Data suhu ruangan
- Data kelembapan ruangan
- Data intensitas cahaya
- Data aktivitas ruangan

Data status sistem:

- Status ruangan (*Idle*, *Preparation*, dan *In-Use*)
- Mode ruang operasi (*General* dan *Ortho*)

Data komunikasi:

- Data MQTT dari ESP32 menuju Unity 3D

Aksi pengguna:

- Menjalankan aplikasi Unity 3D
- Membuka dashboard monitoring
- Memilih mode ruang operasi

1.4.5.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Dashboard Monitoring Digital Twin adalah sebagai berikut:

- Dashboard monitoring yang menampilkan kondisi sistem secara *real-time*
- Informasi status ruangan dan mode ruang operasi
- Informasi kondisi lingkungan miniatur ruang operasi
- Pembaruan data monitoring secara otomatis tanpa *refresh* manual

1.4.5.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- ESP32 terhubung dengan jaringan Wi-Fi
- MQTT Broker aktif
- Unity 3D berjalan dengan baik

Pascakondisi:

- Dashboard monitoring berhasil menampilkan data sistem secara *real-time*

Langkah-langkah:

1. Pengguna menjalankan aplikasi Unity 3D.
2. Sistem menampilkan dashboard monitoring ruang operasi.
3. ESP32 membaca data kondisi sistem.
4. ESP32 mengirimkan data menuju MQTT Broker.
5. Unity 3D menerima data melalui MQTT.
6. Dashboard monitoring memperbarui informasi sistem secara otomatis.
7. Pengguna melihat kondisi ruang operasi secara *real-time*.

1.4.5.6 Skenario Ekseprional 1

Gagal Menerima Data MQTT

Prakondisi:

- Unity 3D berjalan dengan baik
- MQTT Broker tidak dapat diakses

Pascakondisi:

- Dashboard monitoring tidak memperbarui data terbaru

Langkah-langkah:

1. Unity 3D mencoba menerima data MQTT.
2. Sistem gagal menerima data.
3. Dashboard monitoring mempertahankan data terakhir.

4. Sistem mencoba melakukan koneksi ulang secara otomatis.

1.4.5.7 Skenario Eksepsional 2

Data Sensor Tidak Tersedia

Prakondisi:

- Dashboard monitoring aktif
- Sensor mengalami gangguan pembacaan

Pascakondisi:

- Dashboard monitoring tidak menampilkan pembaruan data terbaru

Langkah-langkah:

1. ESP32 mencoba membaca data sensor.
2. Sensor gagal memberikan data.
3. Unity 3D tidak menerima data terbaru.
4. Dashboard monitoring menampilkan status data tidak tersedia.

1.4.5.8 Skenario Eksepsional 3

Perubahan Mode Ruang Operasi Dibatalkan Pengguna

Prakondisi:

- Dashboard monitoring Unity 3D sedang aktif.
- Pengguna membuka pilihan mode ruang operasi.

Pascakondisi:

- Mode ruang operasi tidak berubah.
- Dashboard monitoring tetap menampilkan mode sebelumnya.

Langkah-langkah:

1. Pengguna membuka menu pilihan mode ruang operasi pada Unity 3D.
2. Sistem menampilkan pilihan mode *General* dan *Ortho*.
3. Pengguna membatalkan proses perubahan mode ruang operasi.
4. Sistem menutup menu pilihan mode.
5. Sistem tidak melakukan perubahan visualisasi ruang operasi.
6. Dashboard monitoring tetap menampilkan mode ruang operasi sebelumnya.

1.4.6 Fitur Mode Ruang Operasi

1.4.6.1 Deskripsi

Fitur Mode Ruang Operasi digunakan untuk mengatur tampilan simulasi ruang operasi pada aplikasi Unity 3D berdasarkan jenis mode operasi yang dipilih pengguna. Sistem

menyediakan dua pilihan mode ruang operasi, yaitu *General* dan *Ortho*. Setiap mode memiliki tampilan visual dan konfigurasi simulasi yang berbeda pada model Digital Twin ruang operasi.

Mode *General* digunakan untuk merepresentasikan ruang operasi umum, sedangkan mode *Ortho* digunakan untuk merepresentasikan ruang operasi ortopedi. Perubahan mode ruang operasi dilakukan melalui dashboard monitoring pada Unity 3D dan divisualisasikan secara langsung pada model tiga dimensi ruang operasi.

Fitur ini bertujuan untuk meningkatkan interaktivitas simulasi serta membantu pengguna memahami konsep representasi ruang operasi berbasis Digital Twin secara lebih realistis dan dinamis.

1.4.6.2 Trigger

Fitur Mode Ruang Operasi dieksekusi pada kondisi berikut:

1. Manual (memilih mode ruang operasi)
Pengguna memilih mode ruang operasi *General* atau *Ortho* pada dashboard monitoring Unity 3D.
2. Otomatis (pembaruan visualisasi)
Unity 3D memperbarui visualisasi model ruang operasi berdasarkan mode yang dipilih pengguna.

1.4.6.3 Input

Data masukan yang digunakan dalam fitur Mode Ruang Operasi meliputi:

- 1. Data mode ruang operasi:**
 - Mode ruang operasi *General*.
 - Mode ruang operasi *Ortho*.
- 2. Data komunikasi:**
 - Data perubahan mode ruang operasi pada Unity 3D.
- 3. Aksi pengguna:**
 - Memilih mode ruang operasi pada dashboard monitoring.

1.4.6.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Mode Ruang Operasi adalah sebagai berikut:

1. Tampilan mode ruang operasi *General* pada Unity 3D.
2. Tampilan mode ruang operasi *Ortho* pada Unity 3D.
3. Perubahan visual model Digital Twin ruang operasi sesuai mode yang dipilih.
4. Informasi mode ruang operasi pada dashboard monitoring.

1.4.6.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Unity 3D berjalan dengan baik.
- Dashboard monitoring aktif.
- Model Digital Twin ruang operasi tersedia pada sistem.

Pascakondisi:

- Mode ruang operasi berhasil diperbarui.
- Visualisasi ruang operasi berubah sesuai mode yang dipilih pengguna.

Langkah-langkah:

1. Pengguna membuka dashboard monitoring Unity 3D.
2. Sistem menampilkan pilihan mode ruang operasi.
3. Pengguna memilih mode *General* atau *Ortho*.
4. Unity 3D memproses perubahan mode ruang operasi.
5. Sistem memperbarui visualisasi model Digital Twin ruang operasi.
6. Dashboard monitoring menampilkan mode ruang operasi yang aktif.
7. Pengguna melihat perubahan tampilan ruang operasi secara *real-time*.

1.4.6.6 Skenario Eksepsional 1

Gagal Memuat Visualisasi Mode Ruang Operasi

Prakondisi:

- Pengguna memilih mode ruang operasi.
- Unity 3D mengalami gangguan pemrosesan visualisasi.

Pascakondisi:

- Visualisasi ruang operasi tidak berubah.
- Dashboard monitoring tetap menampilkan mode sebelumnya.

Langkah-langkah:

1. Pengguna memilih mode ruang operasi pada dashboard monitoring.
2. Unity 3D mencoba memperbarui visualisasi ruang operasi.
3. Sistem mengalami kegagalan pemrosesan visualisasi.
4. Visualisasi ruang operasi tidak berubah.
5. Sistem menampilkan indikator kegagalan perubahan mode ruang operasi.

1.4.6.7 Skenario Eksepsional 2

Perubahan Mode Ruang Operasi Dibatalkan Pengguna

Prakondisi:

- Menu pilihan mode ruang operasi sedang ditampilkan.

Pascakondisi:

- Mode ruang operasi tidak berubah.
- Dashboard monitoring tetap menampilkan mode sebelumnya.

Langkah-langkah:

1. Pengguna membuka menu pilihan mode ruang operasi.
2. Sistem menampilkan pilihan mode *General* dan *Ortho*.
3. Pengguna membatalkan proses perubahan mode ruang operasi.
4. Sistem menutup menu pilihan mode.
5. Sistem tidak memperbarui visualisasi ruang operasi.
6. Dashboard monitoring tetap menampilkan mode sebelumnya.

1.4.7 Fitur Otomatisasi Status Ruangan

1.4.7.1 Deskripsi

Fitur Otomatisasi Status Ruangan digunakan untuk mengelola perubahan kondisi operasional ruang operasi secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor lingkungan dan logika sistem yang telah dirancang. Fitur ini bertujuan untuk membantu proses simulasi ruang operasi agar dapat berjalan secara dinamis tanpa memerlukan intervensi pengguna secara terus-menerus.

Mekanisme otomatisasi dilakukan melalui kombinasi pembacaan kondisi lingkungan, aktivitas ruangan, serta mekanisme waktu (*timer*) untuk mendukung proses perubahan status sistem secara lebih stabil dan tidak mudah terpengaruh gangguan sesaat (*noise*). Dengan mekanisme tersebut, sistem mampu merepresentasikan tahapan operasional ruang operasi secara lebih realistis dalam simulasi *Digital Twin*.

1.4.7.2 Trigger

Fitur Otomatisasi Status Ruangan dijalankan berdasarkan perubahan kondisi ruang operasi dan interaksi pengguna pada sistem. Mekanisme perubahan status mengikuti logika sistem yang diterapkan pada ESP32 dan aplikasi Unity 3D.

1. Pemicu Otomatis Sistem (Automatic Trigger)

Sistem secara otomatis melakukan evaluasi kondisi ruang operasi berdasarkan data sensor dan aktivitas yang terdeteksi pada miniatur fisik. Perubahan status dilakukan

berdasarkan logika Finite State Machine (FSM), seperti perubahan dari IDLE menjadi PREPARATION ketika aktivitas terdeteksi, serta kembali ke IDLE melalui mekanisme Auto IDLE ketika tidak terdapat aktivitas dalam waktu tertentu.

2. Interaksi Pengguna (User Interaction)

Pengguna dapat melakukan pengaturan atau pengulangan simulasi melalui aplikasi Unity 3D Dashboard, seperti menjalankan kembali skenario operasi, memilih kondisi simulasi, atau melakukan reset sistem untuk mengembalikan kondisi ruang operasi ke keadaan awal.

1.4.7.3 Input

Data masukan yang digunakan pada fitur **Otomatisasi Status Ruangan** meliputi:

Data lingkungan dan aktivitas:

- Data intensitas cahaya ruangan
- Data aktivitas ruangan
- Data keberadaan objek pada area operasi

Data status sistem:

- Status operasional sebelumnya
- Waktu perubahan kondisi (*timer*)

Aksi pengguna:

- Reset simulasi sistem
- Perubahan kondisi ruangan secara manual

1.4.7.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur **Otomatisasi Status Ruangan** adalah sebagai berikut:

- Perubahan status operasional ruang operasi secara otomatis
- Sinkronisasi status pada dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin*
- Pencegahan perubahan status akibat gangguan sesaat (*false trigger*)
- Pembaruan kondisi sistem secara *real-time*

1.4.7.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- ESP32 terhubung dengan jaringan komunikasi
- MQTT Broker aktif
- Sistem monitoring berjalan dengan baik

Pascakondisi:

- Status ruang operasi berubah sesuai kondisi simulasi

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca kondisi lingkungan dan aktivitas ruangan.
2. Sistem mengevaluasi data sensor yang diterima.
3. Sistem menjalankan logika perubahan status berdasarkan kondisi yang terdeteksi.
4. Sistem melakukan validasi menggunakan mekanisme *timer*.
5. Status ruang operasi diperbarui secara otomatis.
6. Data status dikirim menuju Unity 3D melalui MQTT.
7. Dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin* diperbarui secara *real-time*.

1.4.Skenario 7.6 Eksepsional 1**Gangguan Pembacaan Sensor****Prakondisi:**

- Sensor mengalami pembacaan tidak stabil

Pascakondisi:

- Sistem mempertahankan status sebelumnya

Langkah-langkah:

1. Sistem menerima pembacaan sensor yang tidak stabil.
2. Sistem melakukan validasi melalui mekanisme *timer*.
3. Sistem mengabaikan perubahan kondisi sesaat.
4. Status operasional tetap dipertahankan.

1.4.7.7 Skenario Eksepsional 2**Komunikasi Sistem Terputus****Prakondisi:**

- MQTT Broker tidak aktif atau jaringan terganggu

Pascakondisi:

- Visualisasi sistem tidak menerima pembaruan terbaru

Langkah-langkah:

1. ESP32 mencoba mengirimkan data status.
2. MQTT Broker gagal menerima komunikasi.
3. Unity 3D tidak menerima pembaruan data terbaru.
4. Sistem mencoba melakukan komunikasi ulang secara otomatis.

1.4.8 Fitur Monitoring dan Pengendalian *Cooling Fan*

1.4.8.1 Deskripsi

Fitur Pengendalian *Cooling Fan* digunakan untuk mengelola sistem pendingin pada miniatur ruang operasi sebagai bagian dari simulasi pengendalian kondisi lingkungan dan efisiensi energi (*energy saving*). *Cooling fan* berfungsi untuk merepresentasikan mekanisme pendinginan ruangan yang disesuaikan dengan kondisi operasional sistem dan perubahan suhu lingkungan.

Pengendalian *cooling fan* dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi sistem yang sedang berlangsung. Selain itu, fitur ini juga mendukung representasi visual pada *Digital Twin* sehingga pengguna dapat memahami hubungan antara perubahan kondisi lingkungan dengan respons sistem pendingin secara *real-time*.

1.4.8.2 Trigger

Fitur Pengendalian *Cooling Fan* dieksekusi pada kondisi berikut:

1. Otomatis (perubahan suhu ruangan)
Sistem mendeteksi suhu ruangan yang telah melewati batas yang ditentukan.
2. Otomatis (perubahan kondisi operasional sistem)
Sistem menyesuaikan kondisi *cooling fan* berdasarkan status operasional ruang operasi.
3. Manual (simulasi pengguna)
Pengguna menjalankan simulasi sistem pada Unity 3D atau miniatur fisik.

1.4.8.3 Input

Data masukan yang digunakan meliputi:

Data lingkungan:

- Data suhu ruangan
- Data status operasional sistem

Data logika sistem:

- Batas suhu pengaktifan *cooling fan*
- Kondisi simulasi ruang operasi

Aksi pengguna:

- Menjalankan simulasi sistem
- Melakukan reset simulasi

1.4.8.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Pengendalian Cooling Fan meliputi:

- Aktivasi atau nonaktif cooling fan sesuai kondisi sistem
- Sinkronisasi kondisi cooling fan pada dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin*
- Penyesuaian kondisi pendinginan ruang operasi simulasi
- Dukungan mekanisme efisiensi energi (*energy saving*)

1.4.8.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Sistem monitoring aktif
- Sensor suhu bekerja dengan baik
- Unity 3D dan MQTT Broker berjalan normal

Pascakondisi:

- Cooling fan berhasil menyesuaikan kondisi sistem

Langkah-langkah:

1. Sistem membaca kondisi suhu ruangan.
2. Sistem mengevaluasi kondisi suhu berdasarkan batas yang telah ditentukan.
3. Sistem mengevaluasi kondisi operasional ruang operasi.
4. Cooling fan diaktifkan atau dinonaktifkan sesuai logika sistem.
5. Status cooling fan dikirim menuju Unity 3D melalui MQTT.
6. Dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin* diperbarui secara otomatis.

1.4.8.6 Skenario Eksepsional 1

Sensor Suhu Tidak Tersedia

Prakondisi:

- Sensor suhu mengalami gangguan pembacaan

Pascakondisi:

- Cooling fan mempertahankan kondisi terakhir

Langkah-langkah:

1. Sistem mencoba membaca suhu ruangan.
2. Sensor gagal memberikan data.
3. Sistem mempertahankan kondisi cooling fan sebelumnya.
4. Dashboard monitoring tidak menerima pembaruan terbaru.

1.4.8.7 Skenario Eksepsional 2

Gangguan Komunikasi Sistem

Prakondisi:

- MQTT Broker tidak aktif atau jaringan terganggu

Pascakondisi:

- Unity 3D tidak menerima pembaruan kondisi cooling fan

Langkah-langkah:

1. ESP32 mencoba mengirimkan status cooling fan.
2. Komunikasi gagal dilakukan.
3. Dashboard monitoring tidak menerima pembaruan terbaru.
4. Sistem mencoba melakukan komunikasi ulang secara otomatis.

1.4.9 Fitur Visualisasi Digital Twin Ruang Operasi

1.4.9.1 Deskripsi

Fitur Visualisasi Digital Twin Ruang Operasi digunakan untuk menampilkan representasi digital dari miniatur ruang operasi pada aplikasi Unity 3D secara *real-time*. Fitur ini memungkinkan pengguna melihat kondisi ruang operasi dalam bentuk model tiga dimensi yang memiliki kesesuaian dengan tata letak dan struktur miniatur fisik.

Visualisasi Digital Twin menampilkan perubahan kondisi ruangan berdasarkan data sensor yang diterima dari ESP32 menggunakan protokol MQTT. Informasi seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, aktivitas ruangan, status ruangan, kondisi pencahayaan, dan *cooling fan* divisualisasikan secara interaktif pada model tiga dimensi ruang operasi. Fitur ini juga mendukung perubahan mode ruang operasi *General* dan *Ortho*, sehingga pengguna dapat melihat simulasi ruang operasi sesuai konfigurasi yang dipilih. Selain itu, perubahan status ruangan *Idle*, *Preparation*, dan *In-Use* akan langsung memengaruhi visualisasi pencahayaan, indikator warna, dan kondisi perangkat pada Unity 3D.

Pengembangan fitur ini bertujuan untuk merepresentasikan konsep Digital Twin secara realistis sebagai media pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT). Dengan adanya visualisasi Digital Twin, pengguna dapat memahami hubungan antara sistem fisik berupa miniatur ruang operasi dengan sistem digital secara lebih interaktif.

1.4.9.2 Trigger

Fitur Visualisasi Digital Twin Ruang Operasi dieksekusi pada kondisi berikut:

1. Manual (menjalankan aplikasi Unity 3D)
Pengguna menjalankan aplikasi Unity 3D sehingga sistem menampilkan model tiga dimensi ruang operasi beserta dashboard monitoring.
2. Otomatis (*real-time visualization*)
ESP32 mengirimkan data sensor menuju Unity 3D menggunakan MQTT sehingga visualisasi Digital Twin diperbarui secara otomatis.
3. Manual (perubahan mode ruang operasi)
Pengguna memilih mode ruang operasi *General* atau *Ortho* pada dashboard monitoring Unity 3D.
4. Otomatis (perubahan status ruangan)
Sistem mendeteksi perubahan status ruangan *Idle*, *Preparation*, atau *In-Use* sehingga visualisasi diperbarui secara otomatis.

1.4.9.3 Input

Data masukan yang digunakan dalam fitur Visualisasi Digital Twin Ruang Operasi meliputi:

Data sensor:

- Data suhu dari BME280 Environmental Sensor Module.
- Data kelembapan dari BME280 Environmental Sensor Module.
- Data intensitas cahaya dari LDR GL5528 Light Sensor Module.
- Data aktivitas dari PIR HC-SR501 Motion Sensor.

Data status ruangan:

- Status ruangan *Idle*.
- Status ruangan *Preparation*.
- Status ruangan *In-Use*.

Data mode ruang operasi:

- Mode ruang operasi *General*.
- Mode ruang operasi *Ortho*.

Data perangkat:

- Status LED strip.
- Status LED indikator.
- Status *cooling fan*.

Data komunikasi:

- Data MQTT dari ESP32 menuju Unity 3D.

Aksi pengguna:

- Menjalankan aplikasi Unity 3D.
- Memilih mode ruang operasi.
- Membuka dashboard monitoring.

1.4.9.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Visualisasi Digital Twin Ruang Operasi adalah sebagai berikut:

1. Model tiga dimensi ruang operasi pada Unity 3D.
2. Visualisasi kondisi ruangan berdasarkan data sensor secara *real-time*.
3. Perubahan pencahayaan ruang operasi sesuai status ruangan.
4. Visualisasi kondisi *cooling fan* dan perangkat lainnya.
5. Tampilan mode ruang operasi *General* dan *Ortho*.
6. Dashboard monitoring yang menampilkan informasi kondisi ruangan.

1.4.9.5 Skenario Utama

Prakondisi:

- Unity 3D berjalan dengan baik.
- MQTT Broker aktif.
- ESP32 terhubung dengan jaringan Wi-Fi.
- Data sensor tersedia.

Pascakondisi:

- Visualisasi Digital Twin berhasil ditampilkan.
- Model ruang operasi diperbarui sesuai kondisi sistem secara *real-time*.

Langkah-langkah:

1. Pengguna menjalankan aplikasi Unity 3D.
2. Sistem menampilkan model Digital Twin ruang operasi.
3. ESP32 membaca data sensor lingkungan.
4. ESP32 mengirimkan data menuju MQTT Broker.
5. Unity 3D menerima data melalui MQTT.
6. Sistem memperbarui visualisasi ruang operasi berdasarkan data sensor.
7. Dashboard monitoring menampilkan kondisi terbaru secara *real-time*.
8. Pengguna melihat perubahan kondisi ruang operasi pada model tiga dimensi.

1.4.9.6 Skenario Eksepsional 1

Model Digital Twin Gagal Ditampilkan

Prakondisi:

- Unity 3D dijalankan oleh pengguna.

Pascakondisi:

- Visualisasi ruang operasi tidak tampil.
- Dashboard monitoring tetap berjalan.

Langkah-langkah:

1. Pengguna menjalankan Unity 3D.
2. Sistem mencoba memuat model ruang operasi.
3. Model gagal dimuat.
4. Sistem menampilkan indikator kesalahan visualisasi.
5. Dashboard monitoring tetap berjalan menggunakan data sensor.

1.4.9.7 Skenario Eksepsional 2

Data Sensor Tidak Diterima oleh Unity 3D

Prakondisi:

- Unity 3D aktif.
- MQTT Broker mengalami gangguan.

Pascakondisi:

- Visualisasi tidak diperbarui.
- Dashboard monitoring menampilkan data terakhir.

Langkah-langkah:

1. Unity 3D mencoba menerima data MQTT.
2. Sistem gagal menerima data sensor.
3. Model Digital Twin tidak diperbarui.
4. Dashboard monitoring mempertahankan data terakhir.
5. Sistem mencoba melakukan koneksi ulang secara otomatis.

1.4.10 Fitur Komunikasi Data MQTT *Real-Time*

1.4.10.1 Deskripsi

Fitur Komunikasi Data *Real-Time* Berbasis MQTT digunakan untuk mendukung proses pertukaran data antara miniatur fisik ruang operasi dan aplikasi Unity 3D secara *real-time*. Fitur ini berfungsi untuk memastikan sinkronisasi kondisi sistem fisik dengan visualisasi *Digital Twin* dapat berlangsung secara dinamis selama simulasi berjalan.

Komunikasi data dilakukan menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) yang mendukung mekanisme pertukaran data ringan dan cepat pada sistem berbasis Internet of Things (IoT). Melalui mekanisme ini, perubahan kondisi lingkungan, status ruangan, maupun kondisi perangkat simulasi dapat diperbarui secara otomatis pada aplikasi Unity 3D.

1.4.10.2 Trigger

Fitur Komunikasi Data Real-Time Berbasis MQTT berjalan berdasarkan proses pertukaran data antara perangkat IoT, MQTT Broker, dan aplikasi Unity 3D. Mekanisme komunikasi dilakukan secara otomatis ketika terjadi perubahan kondisi pada sistem.

1. Pemicu Otomatis Sistem (Automatic Trigger)

Sistem secara otomatis mengirimkan data ketika terjadi perubahan kondisi pada ruang operasi, seperti perubahan nilai sensor, perubahan status ruangan, atau perubahan kondisi perangkat simulasi. Data tersebut dikirimkan oleh ESP32 menuju MQTT Broker menggunakan mekanisme *publish* untuk diteruskan ke aplikasi Unity 3D.

2. Sinkronisasi Data Digital Twin (Data Synchronization)

Aplikasi Unity 3D secara otomatis menerima data melalui mekanisme *subscribe* dari MQTT Broker untuk memperbarui dashboard monitoring dan visualisasi Digital Twin sesuai dengan kondisi aktual miniatur fisik secara real-time.

3. Interaksi Pengguna (User Interaction)

Pengguna dapat memulai proses simulasi dengan menjalankan aplikasi Unity 3D atau mengoperasikan miniatur ruang operasi. Setelah sistem aktif, proses komunikasi data berjalan secara otomatis tanpa memerlukan pengiriman data secara manual.

1.4.10.3 Input

Data masukan yang digunakan meliputi:

Data monitoring sistem:

- Data kondisi lingkungan ruangan
- Data aktivitas ruangan
- Data status operasional sistem
- Data mode ruang operasi
- Data kondisi perangkat simulasi

Data komunikasi:

- Topic MQTT
- Payload data komunikasi sistem

Aksi pengguna:

- Menjalankan simulasi sistem
- Reset sistem monitoring

1.4.10.4 Output

Luaran yang dihasilkan dari fitur Komunikasi Data *Real-Time* Berbasis MQTT meliputi:

- Sinkronisasi kondisi miniatur fisik dengan Unity 3D secara *real-time*
- Pembaruan dashboard monitoring secara otomatis
- Pembaruan visualisasi *Digital Twin* tanpa *refresh* manual
- Pengiriman dan penerimaan data sistem secara berkelanjutan

1.4.10.5 Skenario Utama**Prakondisi:**

- ESP32 aktif dan terhubung jaringan
- MQTT Broker berjalan dengan baik
- Unity 3D aktif dan terhubung dengan MQTT

Pascakondisi:

- Data sistem berhasil tersinkronisasi secara *real-time*

Langkah-langkah:

1. Sensor membaca kondisi sistem pada miniatur ruang operasi.
2. ESP32 memproses hasil pembacaan sensor.
3. Data dikirim menuju MQTT Broker.
4. Unity 3D menerima data komunikasi sistem.
5. Dashboard monitoring diperbarui secara otomatis.
6. Visualisasi *Digital Twin* diperbarui secara sinkron dengan kondisi fisik.

1.4.10.6 Skenario Eksepsional 1**MQTT Broker Tidak Aktif****Prakondisi:**

- MQTT Broker mengalami gangguan

Pascakondisi:

- Sistem tidak menerima pembaruan terbaru

Langkah-langkah:

1. ESP32 mencoba mengirim data.
2. MQTT Broker tidak dapat menerima komunikasi.

3. Unity 3D tidak menerima data terbaru.
4. Sistem mencoba melakukan koneksi ulang secara otomatis.

1.4.10.7 Skenario Eksepsional 2

Jaringan Komunikasi Tidak Stabil

Prakondisi:

- Koneksi jaringan terganggu

Pascakondisi:

- Sinkronisasi sistem mengalami keterlambatan (*delay*)

Langkah-langkah:

1. Sistem mencoba mengirimkan data.
2. Proses komunikasi mengalami gangguan jaringan.
3. Data diterima dengan keterlambatan atau tidak lengkap.
4. Sistem melakukan sinkronisasi ulang saat koneksi kembali stabil.

1.5 Kebutuhan Nonfungsional

1.5.1 Atribut Kualitas

- Kinerja (*Performance*)

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi harus mampu melakukan proses monitoring, komunikasi data, dan visualisasi kondisi sistem secara *real-time*. Proses pembacaan kondisi lingkungan, pengiriman data melalui MQTT, serta pembaruan informasi pada aplikasi Unity 3D harus berlangsung dengan waktu respons yang cepat sehingga perubahan kondisi miniatur ruang operasi dapat divisualisasikan secara sinkron pada model *Digital Twin*.

Kinerja sistem juga mencakup kemampuan dashboard monitoring dalam memperbarui informasi secara otomatis tanpa memerlukan proses *refresh* manual selama simulasi berlangsung.

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Sistem mampu melakukan pembaruan data secara *real-time*.
- Dashboard monitoring memperbarui informasi secara otomatis.
- Komunikasi data memiliki waktu respons yang stabil.
- Visualisasi *Digital Twin* mampu mengikuti perubahan kondisi miniatur secara sinkron.

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Keandalan (*Reliability*)

Sistem harus mampu beroperasi secara stabil selama proses simulasi berlangsung tanpa mengalami kegagalan fungsi utama. Seluruh komponen sistem, termasuk sensor lingkungan, komunikasi data, dan visualisasi Unity 3D harus dapat bekerja secara konsisten untuk mendukung proses monitoring dan simulasi ruang operasi. Selain itu, sistem harus mampu mempertahankan kondisi operasional ketika terjadi gangguan komunikasi maupun pembacaan sensor melalui mekanisme validasi data dan pengulangan komunikasi (*retry mechanism*).

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Sistem berjalan stabil selama simulasi berlangsung.
- Sistem mampu mempertahankan kondisi terakhir ketika terjadi gangguan komunikasi.
- Sistem mampu menangani pembacaan sensor yang tidak stabil.
- Proses monitoring tetap berjalan meskipun terjadi keterlambatan komunikasi sementara.

- Kompatibilitas (*Compatibility*)

Sistem harus mampu berjalan pada perangkat komputer atau laptop yang mendukung aplikasi Unity 3D serta mampu terintegrasi dengan perangkat IoT yang digunakan pada miniatur ruang operasi. Selain itu, komunikasi antara ESP32 dan Unity 3D harus dapat berjalan secara kompatibel melalui protokol MQTT.

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Sistem dapat berjalan pada perangkat berbasis Windows.
- Unity 3D dapat menerima data dari perangkat IoT menggunakan MQTT.
- ESP32 kompatibel dengan sensor dan aktuator yang digunakan.
- Sistem mendukung integrasi perangkat lunak dan perangkat keras secara sinkron.

- Kemudahan Penggunaan (*Usability*)

Sistem harus memiliki antarmuka yang mudah dipahami oleh pengguna, khususnya mahasiswa dan dosen sebagai media pembelajaran. Dashboard monitoring dan visualisasi *Digital Twin* harus mampu menyajikan informasi kondisi sistem secara jelas, informatif, dan mudah diinterpretasikan.

Selain itu, indikator visual pada sistem dirancang untuk membantu pengguna memahami kondisi ruang operasi secara lebih cepat selama simulasi berlangsung.

- Dashboard monitoring mudah dipahami pengguna.
- Informasi sistem ditampilkan secara jelas dan informatif.
- Pengguna dapat memahami kondisi sistem melalui indikator visual.
- Antarmuka mendukung proses simulasi pembelajaran secara interaktif.
- Efisiensi Penggunaan Energi (*Energy Efficiency*)

Sistem harus mendukung efisiensi penggunaan energi melalui mekanisme pengelolaan perangkat berdasarkan kondisi operasional ruang operasi. Aktivasi perangkat pendukung seperti pencahayaan dan cooling fan dilakukan sesuai kebutuhan simulasi agar penggunaan energi menjadi lebih optimal.

Selain itu, mekanisme otomatisasi status ruangan digunakan untuk mencegah perangkat tetap aktif ketika ruang operasi tidak digunakan.

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Perangkat bekerja sesuai kondisi operasional sistem.
- Cooling fan aktif berdasarkan kondisi suhu dan simulasi ruang operasi.
- Sistem mampu menonaktifkan perangkat secara otomatis saat tidak digunakan.
- Penggunaan energi mendukung konsep *energy saving*.
- Kemudahan Pemeliharaan (*Maintainability*)

Sistem harus dirancang agar mudah dilakukan pemeliharaan, pengembangan, dan perbaikan baik pada sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Struktur program pada ESP32 dan Unity 3D harus disusun secara modular untuk memudahkan proses *debugging*, pembaruan sistem, maupun penambahan fitur baru.

Kriteria kualitas yang harus dipenuhi sistem meliputi:

- Program ESP32 mudah diperbarui.
- Unity 3D mendukung pengembangan fitur tambahan.
- Sensor dan perangkat dapat diganti tanpa mengubah keseluruhan sistem.
- Struktur sistem mendukung proses pemeliharaan dan pengembangan lanjutan.

1.5.2 Kebutuhan Legal

Sistem Simulasi Real-Time Digital Twin untuk Ruang Operasi dikembangkan sebagai media pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dan Digital Twin di lingkungan

Fakultas Teknologi Informasi Universitas YARSI. Dalam proses pengembangan dan implementasinya, sistem memperhatikan aspek legal terkait penggunaan perangkat lunak, teknologi komunikasi, dan pemanfaatan data sistem.

1. Penggunaan Perangkat Lunak dan Teknologi Pendukung

Sistem menggunakan beberapa perangkat lunak dan teknologi pendukung yang bersifat *open source* maupun berlisensi akademik. Unity 3D digunakan sebagai media pengembangan visualisasi *Digital Twin*, sedangkan Arduino IDE digunakan untuk proses pengembangan perangkat lunak pada mikrokontroler ESP32. Selain itu, komunikasi data sistem menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) yang tersedia secara terbuka sebagai standar komunikasi pada sistem berbasis Internet of Things (IoT).

Penggunaan perangkat lunak dan teknologi tersebut dilakukan sesuai dengan ketentuan lisensi yang berlaku agar tidak melanggar hak penggunaan perangkat lunak.

Kriteria kebutuhan legal:

- Penggunaan Unity 3D mengikuti ketentuan lisensi yang berlaku.
- Penggunaan Arduino IDE dan library pendukung mengikuti ketentuan perangkat lunak *open source*.
- Penggunaan protokol MQTT mengikuti standar komunikasi sistem IoT.

2. Penggunaan Data Monitoring Sistem

Data yang digunakan pada sistem berupa data lingkungan hasil pembacaan sensor, seperti kondisi suhu, kelembapan, pencahayaan, aktivitas ruangan, dan status operasional ruang operasi. Data tersebut digunakan hanya untuk kebutuhan simulasi, pembelajaran, dan pengujian sistem pada miniatur ruang operasi.

Sistem tidak menggunakan data pribadi pengguna maupun data medis pasien sehingga tidak melibatkan aspek privasi data sensitif.

Kriteria kebutuhan legal:

- Data sensor hanya digunakan untuk kebutuhan simulasi dan pembelajaran.
- Sistem tidak menyimpan data pribadi maupun data medis pasien.
- Data monitoring hanya digunakan untuk kebutuhan penelitian dan pengembangan sistem.

3. Kepatuhan terhadap Media Pembelajaran

Sistem dikembangkan sebagai media pembelajaran untuk mendukung pemahaman mahasiswa terhadap integrasi teknologi Internet of Things (IoT),

komunikasi data *real-time*, visualisasi tiga dimensi, dan konsep Digital Twin pada simulasi ruang operasi pintar (*Smart Operating Room*).

Sistem tidak digunakan sebagai perangkat medis nyata, sistem operasional rumah sakit, maupun sistem pendukung pengambilan keputusan klinis, melainkan sebagai media simulasi berbasis prototipe untuk kebutuhan akademik dan penelitian.

Kriteria kebutuhan legal:

- Sistem digunakan untuk kepentingan akademik dan pembelajaran.
- Sistem tidak digunakan sebagai perangkat medis operasional rumah sakit.
- Sistem digunakan terbatas pada kebutuhan simulasi, penelitian, dan pengembangan teknologi.