

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Integrasi *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) dan *Automated Driver System* (ADS) telah menjadi bagian dari perkembangan arsitektur kendaraan modern dalam meningkatkan keselamatan aktif [1]. Berdasarkan SAE J3016, tingkat otonom kendaraan berkembang dari Level 1 hingga Level 5 [2]. Sistem ini bisa mengurangi insiden kecelakaan yang disebabkan oleh 90% kelalaian manusia [3]. Meskipun sistem otonom memiliki kemampuan untuk memantau lingkungan dan merespons kondisi berkendara secara lebih cepat dibandingkan pengemudi pada situasi tertentu, pengoperasiannya tetap menghadapi potensi kegagalan akibat kondisi lingkungan, infrastruktur, maupun keterbatasan sistem [4]. Kondisi tersebut mendorong kebutuhan pengujian dan evaluasi yang memungkinkan pengembang atau operator mengamati perilaku sistem secara menyeluruh selama proses pengembangan dan pengujian.

Pengujian sistem kendaraan otonom memerlukan pemantauan operator untuk mengamati kondisi dan perilaku kendaraan secara menyeluruh [5]. Dalam proses pengujian, operator memperoleh informasi kondisi kendaraan melalui pengamatan langsung dan data telemetri [6]. Namun, pengamatan langsung dapat terbatas oleh jarak dan kondisi lingkungan [7], sedangkan data telemetri dalam bentuk data numerik atau log tidak secara langsung memberikan representasi visual mengenai kondisi dan pergerakan kendaraan [8]. Kemampuan untuk memberikan kendali dari jarak jauh serta meninjau kembali hasil pengujian untuk mengevaluasi perilaku kendaraan tanpa harus mengulangi pengujian fisik dapat membantu operator untuk melakukan pengujian dan pengembangan kendaraan otonom [9].

Oleh karena itu, diperlukan sistem yang dapat mengintegrasikan pemantauan kondisi kendaraan, kendali jarak jauh, serta perekaman dan *playback* data pengujian dalam satu lingkungan. Pendekatan *Digital Twin* dapat digunakan untuk merepresentasikan kondisi kendaraan secara visual pada lingkungan virtual [9], mendukung pertukaran informasi dan kendali, serta merekonstruksi kondisi pengujian berdasarkan data rekaman.

Relevan dengan kebutuhan tersebut, Pusat Riset Mekatronika Cerdas Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Bandung tengah mengembangkan prototipe *Micro Electrical Vehicle* (MEVi), sebuah kendaraan listrik Otonom dengan taraf SAE Level 2 di mana prototipe ini dalam pengembangan sistem *low level control*, *lane-keeping assistance*, dan teleoperasi yang dilengkapi perangkat komputasi Jetson AGX Orin dan multi-sensor [10]. Namun, pengujian di lapangan terkendala oleh keterbatasan pengawasan visual dan data telemetri yang hanya berbasis numerik. Kondisi ini menyulitkan operator untuk memvalidasi perilaku pergerakan MEVi, terutama saat kendaraan beroperasi di luar jangkauan pandangan langsung. Lebih lanjut, pada saat melakukan pengujian sistem otonom, operator masih mengandalkan representasi terminal secara terpisah untuk memberi perintah dari jarak jauh dan untuk memahami kondisi MEVi [10]. Ketiadaan lingkungan yang terintegrasi untuk melakukan pengujian menjadi celah keamanan.

Untuk mengatasi masalah pengawasan dan risiko pengujian sistem tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem *Digital Twin*, mengintegrasikan *game engine* Unity dan *Middleware Robot Operating System 2* (ROS 2) dengan fungsi pemantauan yang memvisualisasikan perilaku MEVi berdasarkan data sensor secara *real-time*, memberikan antarmuka untuk mendukung sistem teleoperasi pada MEVi, sistem untuk merekam data telemetri dan pemutar ulang data rekam. Komunikasi data antara entitas fisik dan virtual terjadi secara *bi-derectional*. Unity dipilih sebagai *platform* pengembangan sistem karena fleksibilitas dalam mengintegrasikan sistem operasi robot seperti ROS 2 [11], ROS 2 dipilih untuk komunikasi data antar proses karena keandalannya dalam mendistribusikan data dari berbagai proses secara bersamaan berkat standar *Data Distribution Service* (DDS) yang digunakannya [12].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *Digital Twin* untuk MEVi. Sistem ini difokuskan untuk menyediakan antarmuka pengawasan *real-time*, mendukung sistem teleoperasi MEVi, perekaman data, dan pemutar ulang data rekam guna membantu operator dalam melakukan pengujian sistem MEVi di lingkungan terbatas BRIN.

1.2 Kajian Terdahulu

Kajian terdahulu disusun berdasarkan penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai acuan. Penelitian ini memiliki perbedaan pada sistem, alat, dan variabel yang digunakan. Tabel 1.1 merupakan referensi jurnal berisi ringkasan penelitian terdahulu terkait sistem *Digital twin* untuk pengujian sistem otonom sebagai pembeda penelitian tugas akhir ini.

Tabel 1.1 Referensi jurnal

No	JUDUL	PENELITI	TAHUN
1	<i>Unity and ROS as a Digital and Communication Layer for Digital Twin Application: Case Study of Robotic Arm in a Smart Manufacturing Cell.</i>	Maulshree Singh, Jayasekara Kapukotuwa, Yuansong Qiao, Eber Lawrence Souza Gouveia, Niall Murry and Declan Devine, Evert.	2025
2	<i>Design, Implementation and Evaluation of an Immersive Teleoperation Interface for Human-Centered Autonomous Driving.</i>	Irene Bouzón, Jimena Pascual, Cayetana Costales, Aser Crespo, Covadonga Cima and David Melendi.	2025
3	<i>Seeing the City Live: Bridging Edge Vehicle Perception and Cloud Digital Twins to Empower Smart Cities.</i>	Hafsa Iqbal, Jaime Godoy, Beatriz Martin, Abdulla Al-kaff and Fernando Garcia.	2025
4	<i>APIKS: A Modular ROS2 Framework for Rapid Prototyping and Validation of Automated Driving Systems.</i>	Joao-Vitor Zacchi, Edoardo Clementi, Nuria Mata.	2025
5	<i>PID Steering Control for Lane Keeping Assist based on IMU Sensor and ROS.</i>	Marco Yosafat Siagian, Taufik Ibnu Salim, Philippians Manurung, Rendra Dwi Firmansyah, Yanuandri Putrasari, Bambang Wahono.	2024

Pengembangan arsitektur *Digital Twin* yang mengintegrasikan lapisan digital, fisik, dan komunikasi data telah menjadi fokus utama dalam riset sistem cerdas terkini. Studi memvalidasi bahwa integrasi *game engine* Unity dan *middleware* ROS 2 mampu berfungsi sebagai lapisan komunikasi *Digital twin* untuk simulasi dan teleoperasi yang handal, dengan capaian akurasi sinkronisasi posisi sebesar 99,99% dan latensi rata-rata 77,67 ms [13]. Namun, validasi dalam studi tersebut diterapkan pada kasus lengan robot manufaktur yang beroperasi secara stasioner, sehingga belum merepresentasikan kinematik kendaraan otonom yang bergerak secara dinamis. Dalam domain kendali jarak jauh, pemanfaatan standar *Data Distribution Service* (DDS) pada *middleware* ROS 2 terbukti andal untuk menjamin reliabilitas komunikasi *real-time* dalam sistem teleoperasi kendaraan [14]. Tetapi, pengembangan tersebut lebih menitik beratkan pada pemantauan dengan antarmuka *Virtual Reality* berbasis *Digital Twin*, tanpa menyediakan mekanisme perekaman dan pemutar data rekam.

Pendekatan simulasi skala besar menggunakan simulator CARLA juga telah dikembangkan untuk mencakup persepsi lingkungan lalu lintas yang luas berbasis *cloud* [15]. Akan tetapi, arsitektur terbatas pada kemampuan kustomisasi program dan objek virtual, Unity menawarkan fleksibilitas yang lebih tinggi untuk memodelkan lingkungan [16]. Lebih lanjut, pengujian saat pengembangan sistem *Steering Control for Lane Keeping Assist* pada MEVi masih mengandalkan pemantauan berbasis log data telemetri teks yang menyulitkan operator untuk memahami kondisi dan perilaku MEVi pada saat pengujian berlangsung [10]. Dengan begitu, diperlukan sistem pengawasan yang memvisualisasikan data telemetri ke bentuk visual yang mudah dimengerti secara langsung, sehingga dapat membantu operator dalam melakukan pengujian.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang telah dijelaskan, terdapat beberapa rumusan masalah yang dapat dirumuskan di antaranya:

1. Bagaimana rancangan dan implementasi sistem *Digital Twin* dengan integrasi *game engine* Unity dan *middleware* ROS 2 untuk kendaraan listrik otonom MEVi ?
2. Bagaimana kinerja sistem *Digital Twin* dengan integrasi *game engine* Unity dan *middleware* ROS 2 untuk kendaraan listrik otonom MEVi ?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem *Digital Twin* berbasis integrasi *game engine* Unity dan *middleware* ROS 2 untuk kendaraan listrik otonom MEVi.
2. Menganalisis kinerja sistem validasi berbasis *Digital Twin* berbasis integrasi *game engine* Unity dan *middleware* ROS 2 untuk kendaraan listrik otonom MEVi.

1.4.2 Manfaat

Pada penelitian tugas akhir ini, diharapkan diperoleh manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademik

Penelitian ini berkontribusi pada bidang Robotika dan Sistem Kendaraan Otonom melalui penerapan arsitektur *Digital Twin* untuk mendukung pengamatan, interaksi, dan pengujian kendaraan otonom darat elektrik. Hasil penelitian dapat menjadi referensi akademis bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan dan evaluasi sistem *Digital Twin*, khususnya yang memanfaatkan lingkungan virtual untuk merepresentasikan kondisi kendaraan.

2. Manfaat Teknis

Sistem yang dikembangkan menyediakan media bantu bagi operator dalam melakukan pengamatan dan pengujian MEVi melalui visualisasi kondisi kendaraan secara *real-time*, pemantauan data telemetri, pengiriman perintah kendali jarak jauh, serta perekaman dan *playback* data hasil pengujian. Sistem juga menyediakan integrasi komunikasi antara MEVi dan lingkungan virtual Unity sehingga kondisi kendaraan fisik dapat direpresentasikan pada *Digital Twin*. Hasil pengujian kinerja komunikasi, *rendering*, dan usability dapat menjadi dasar evaluasi teknis terhadap kemampuan sistem dalam mendukung proses pengamatan dan pengujian kendaraan otonom.

1.5 Batasan Masalah

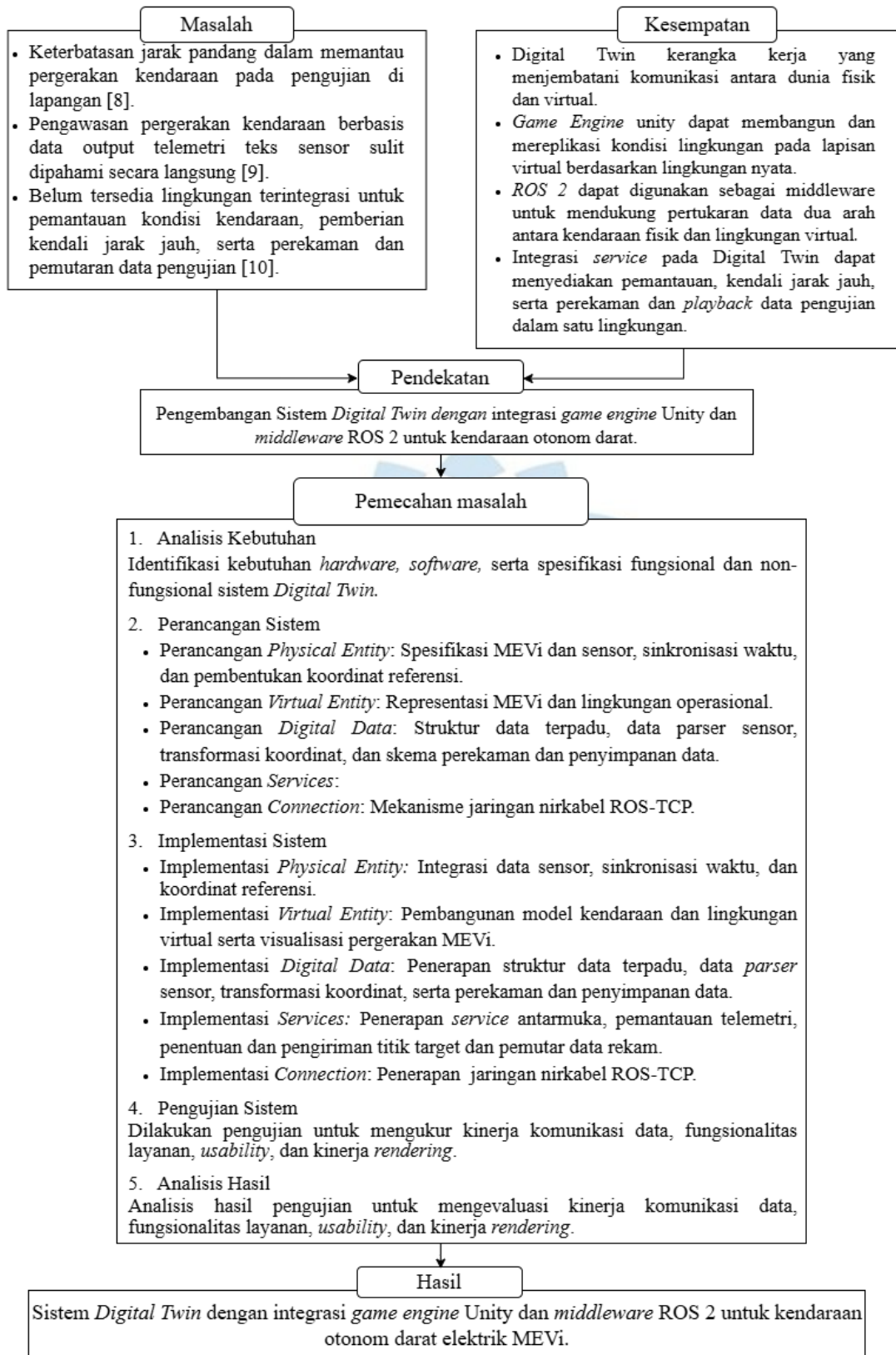
Untuk menjaga penelitian lebih terarah dan fokus penelitian pada tujuan yang ingin dicapai, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini mencakup implementasi sistem *Digital Twin* yang dibangun menggunakan platform *game engine* Unity pada komputer dengan sistem operasi Windows sebagai lingkungan visualisasi virtual dan *middleware Robot Operating System 2* (ROS 2) yang berjalan pada komputer MEVi dengan sistem operasi Ubuntu.
2. Fungsi operator dibatasi pada pengamatan telemetri, visualisasi kondisi MEVi, pengiriman kendali dan target koordinat, serta perekaman dan *playback* data pengujian.
3. Data yang direpresentasikan berasal dari GNSS, IMU, dan encoder serta data keadaan MEVi yang telah diolah untuk kebutuhan Unity.
4. Komunikasi dua arah antara sistem MEVi dan Unity menggunakan paket ROS-TCP-Connector pada Unity dan paket ROS-TCP-Endpoint pada sistem MEVi yang memfasilitasi pengiriman pesan melalui socket TCP/IP.
5. Penelitian ini tidak membahas perancangan perangkat keras, sistem mekanikal, atau elektronika daya dari kendaraan. Prototipe MEVi digunakan sebagai prototipe yang telah tersedia dengan spesifikasi yang sudah ditetapkan oleh BRIN.

6. Penelitian ini tidak mencakup pengembangan algoritma kendali gerak dan aktuator dasar seperti kontrol traksi, rem, stir, dan penghindaran rintangan, algoritma tersebut menggunakan sistem yang sudah tersedia.
7. Penelitian ini tidak mencakup pengembangan algoritma navigasi otonom seperti *Lane Keeping Assist*.
8. Pengembangan dan pengujian dilakukan di lingkungan terbatas di kawasan KST BRIN Samaun Samadikun Bandung, tidak mencakup pengujian di jalan raya umum dengan kondisi lalu lintas campuran.
9. Analisis kinerja komunikasi data tidak mencakup analisis jaringan LTE dan VPN *Overlay Network*, analisis difokuskan pada parameter latensi dan *packet loss*.
10. Penelitian ini tidak membahas aspek keamanan siber, perancangan infrastruktur jaringan fisik, dan pengembangan arsitektur *tunnel Virtual Private Network (VPN)*.
11. Representasi virtual pada Unity difokuskan pada sinkronisasi gerak posisi dan orientasi kendaraan serta visualisasi lingkungan uji secara geometris, bukan pada tingkat detail yang tinggi.
12. Penelitian ini tidak mencakup pemodelan model digital *Unified Robot Description Format (URDF)* kendaraan prototipe MEVi.
13. Pengujian kinerja dibatasi pada komunikasi data, kinerja *rendering*, dan *usability*, tidak mencakup pengujian keselamatan kendaraan secara menyeluruh atau validasi seluruh fungsi otonom.
14. Pengujian fungsional *service* dibatasi pada verifikasi fungsi-fungsi yang tersedia pada sistem Digital Twin melalui pendekatan *black-box testing*.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan alur metodis yang merancang penyelesaian masalah penelitian berdasarkan landasan teoritis dan empiris. Visualisasi langkah-langkah terstruktur ini disajikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Kerangka berpikir penelitian

1.7 Sistematika Penulisan

Sistem penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

BAB I berisi gambaran umum dan dasar-dasar penyusunan tugas akhir sesuai dengan judul penelitian. Meliputi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

BAB II membahas teori dan konsep yang relevan dengan penelitian, termasuk MEVi, *Digital Twin*, *game engine* Unity, *middleware Robot Operating System 2* (ROS 2), GNSS, lingkungan pemrograman, Sensor, dan perangkat komputasi yang digunakan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan metode penelitian, tahapan pengolahan data, dan jadwal yang dilakukan ketika melakukan penelitian terkait perancangan dan implementasi sistem *Digital Twin* untuk kendaraan otonom darat *Micro Electric Vehicles* (MEVi).

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab IV berisi proses perancangan dan implementasi sistem yang dikembangkan, berdasarkan kerangka kerja 5-Dimensional Digital Twin mencakup Entitas Fisik (PE), Virtual (VE), Digital twin Data (DD), Servis (Ss), dan koneksi (CN).

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab V membahas hasil pengujian sistem yang telah dikembangkan, meliputi pengujian kinerja komunikasi data, kinerja jalur koneksi internal, kinerja *rendering*, fungsionalitas *services*, dan *usability* sistem.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab VI berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.