

Evaluasi Performa *Plane Detection* pada *Augmented Reality Markerless* berbasis *Unity* terhadap Variasi Permukaan dan Intensitas Cahaya

Performance Evaluation of Plane Detection in Markerless Augmented Reality under Variations in Surface Characteristics and Light Intensity

¹Muhammad Zaidan Fadhlullah*, ²Mulia Sulistiyono

^{1,2}Program Studi Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta

*e-mail: zaidanfadhlullah@gmail.com

(received: 4 August 2026, revised: 14 August 2026, accepted: 15 August 2026)

Abstrak

Plane Detection merupakan komponen utama pada sistem *Markerless Augmented Reality* karena menentukan kemampuan sistem dalam mengenali bidang untuk penempatan objek virtual. Namun, performa *Plane Detection* dipengaruhi oleh karakteristik permukaan dan intensitas cahaya yang dapat memengaruhi kualitas *feature points* selama proses *tracking*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa *Plane Detection* pada *Markerless Augmented Reality* berbasis *Unity AR Foundation* terhadap variasi karakteristik permukaan dan intensitas cahaya. Pengujian dilakukan menggunakan tiga jenis permukaan, yaitu bertekstur tinggi, bertekstur rendah, dan reflektif, serta tiga kondisi pencahayaan, yaitu terang, redup, dan gelap. Setiap skenario diuji sebanyak lima kali menggunakan empat parameter evaluasi, yaitu *Tracking Time*, *Detection Success Rate*, *Drift Distance*, dan *Coverage Area*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa permukaan bertekstur tinggi memberikan performa terbaik pada seluruh parameter evaluasi dengan *Tracking Time* tercepat sebesar 2.82-6.66 detik, *Detection Success Rate* sebesar 100%, *Drift Distance* terendah sebesar 0.04-1.55 cm, serta *Coverage Area* yang lebih luas dibandingkan kondisi lainnya sebesar 81.04%. Sebaliknya, permukaan bertekstur rendah menjadi kondisi paling menantang, terutama pada kondisi gelap yang menyebabkan kegagalan deteksi pada seluruh pengujian. Sementara itu, permukaan reflektif masih mampu mendeteksi bidang pada sebagian besar pengujian, namun menunjukkan penurunan performa akibat ketidakstabilan *feature points* yang dipengaruhi pantulan cahaya. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan performa *Plane Detection* pada berbagai kombinasi variasi permukaan dan intensitas cahaya.

Kata kunci: Intensitas Cahaya, *Markerless Augmented Reality*, *Plane Detection*, *Unity AR Foundation*, Karakteristik Permukaan.

Abstract

Plane detection is a key component of *markerless augmented reality (AR)* systems, as it determines the system's ability to recognize surfaces for virtual object placement. However, *plane detection* performance is influenced by surface characteristics and lighting intensity, which can affect the quality and stability of *feature points* during the *tracking* process. This study aims to evaluate the performance of *plane detection* in a *Unity-based markerless AR* system using *AR Foundation* under varying surface characteristics and lighting intensities. The experiments were conducted using three surface types: highly textured, low-textured, and reflective surfaces, under three lighting conditions: bright, dim, and dark. Each scenario was tested five times using four evaluation parameters: *tracking time*, *detection success rate*, *drift distance*, and *coverage area*. The results show that highly textured surfaces provided the best overall performance across all evaluation parameters, with the fastest *tracking time* ranging from 2.82 to 6.66 seconds, a *detection success rate* of 100%, the lowest *drift distance* ranging from 0.04 to 1.55 cm, and a wider *coverage area* of 81.04% compared with the other conditions. In contrast, low-textured surfaces presented the most challenging condition, particularly under dark lighting, which resulted in *detection failure* across all trials. Meanwhile, reflective surfaces were still able to detect planes in most trials but exhibited reduced performance due to the instability of *feature points* caused by light reflections. Overall, the findings demonstrate that *plane*

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

detection performance varies across different combinations of surface characteristics and lighting intensities.

Keywords: *lighting conditions, markerless augmented reality, plane detection, unity AR foundation, surface characteristics.*

1 Pendahuluan

Augmented Reality (AR) merupakan teknologi yang membantu penggunanya untuk mendengar, mengamati, serta berinteraksi dengan objek virtual yang diintegrasikan langsung ke dalam lingkungan nyata secara *real-time*. Implementasinya kini telah meluas secara masif ke berbagai sektor, mulai dari pembelajaran interaktif di dunia pendidikan, pariwisata, hingga visualisasi produk pada sektor industri dan hiburan [1]. Sebagian besar sistem AR yang ada saat ini masih mengandalkan metode Marker-Based yang bergantung pada marker fisik berupa *Quick Response Code* (QR Code) atau gambar tertentu untuk memproyeksikan objek virtual ke dunia nyata [2]. Sedangkan penggunaan *marker* fisik dalam pengimplementasian AR sendiri seringkali membatasi ruang gerak penggunanya [3]. Implementasinya kini mulai beralih ke metode *Markerless AR* yang memberikan fleksibilitas ruang serta kenyamanan interaksi bagi penggunanya tanpa harus bergantung pada penggunaan *marker* fisik [3], [4]. Di sisi lain, penggunaan metode *Markerless* menghadirkan tantangan teknis baru yang tidak kalah kompleks, khususnya dalam mempertahankan kestabilan posisi dan orientasi objek visual yang ingin ditampilkan [5].

Ketahanan sistem AR jika dioperasikan pada kondisi lingkungan dengan karakteristik yang beragam masih memerlukan kajian lebih lanjut [5]. Selain itu, masih diperlukannya pengujian pada lingkungan *outdoor* yang lebih kompleks untuk mengevaluasi kemampuan sistem AR dalam mempertahankan proses pelacakan pada lingkungan yang dinamis [6]. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan sistem AR dalam memahami kondisi lingkungan menjadi faktor penting sebelum objek virtual dapat ditempatkan pada lingkungan nyata. Salah satu komponen penting yang mendukung proses tersebut adalah fitur *Plane Detection* dari paket *AR Foundation* pada Unity 3D yang berfungsi mengidentifikasi bidang datar sebagai referensi untuk penempatan objek virtual [7]. Namun, kegagalan *Plane Detection* dalam mengidentifikasi bidang datar dapat menimbulkan ketidaksesuaian antara koordinat objek virtual dan lingkungan nyata yang ditandai dengan munculnya gangguan visual berupa *jittering* [5]. Gangguan visual tersebut menyebabkan objek virtual mengalami pergeseran posisi dari koordinat awal sehingga dapat menurunkan akurasi implementasi AR. Masalah ketidakstabilan visual tersebut kerap ditemui seperti pada aplikasi tata letak interior ruangan, di mana akurasi penempatan model digital di atas permukaan lantai menjadi indikator keberhasilan aplikasi tersebut [8]. Dengan demikian, kegagalan deteksi bidang tidak hanya berdampak bagi aspek teknis sistem, tetapi juga dapat menurunkan kualitas pengalaman pengguna.

Ketidakstabilan performa *Plane Detection* berakar dari ketergantungan algoritma *Visual Simultaneous Localization and Mapping* (V-SLAM) terhadap input visual yang diperoleh dari sensor kamera dalam mengekstraksi *feature points* dari area sekitar [9]. Kualitas ekstraksi *feature points* ini menentukan keberhasilan sistem dalam melakukan pelacakan dan pemetaan ruang. Namun, sistem dapat mengalami keterbatasan dalam mengekstraksi *feature points* pada permukaan dengan tekstur tidak jelas, yang dapat berdampak pada akurasi deteksi bidang [10]. Hasil studi sebelumnya [11] menunjukkan bahwa kondisi ini dapat diperparah oleh perubahan intensitas pencahayaan lingkungan sekitar, ini dibuktikan dengan adanya korelasi yang signifikan antara tingkat redupnya cahaya dengan penurunan akurasi *Plane Detection*. Saat batas toleransi pencahayaan minimum tidak terpenuhi, sistem dapat mengalami peningkatan waktu deteksi (*Tracking Time*) hingga tidak dapat melakukan deteksi secara optimal [5].

Mengacu pada permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa *Plane Detection* pada sistem *Markerless Augmented Reality* ketika dihadapkan dengan variasi karakteristik permukaan dan intensitas cahaya. Evaluasi dilakukan menggunakan aplikasi berbasis Unity yang mampu merekam hasil dari pengujian secara otomatis ke dalam *Comma Separated Values* (CSV) secara *real-time*. Performa *Plane Detection* akan dianalisis berdasarkan empat metrik utama, yaitu waktu deteksi bidang (*Tracking Time*), pergeseran posisi objek virtual (*drift distance*), keberhasilan sistem dalam mendeteksi bidang (*detection success rate*), dan cakupan area yang terdeteksi pada zona uji (*coverage area*) pada berbagai kondisi variasi permukaan dan intensitas

cahaya. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran mengenai batas operasional *Plane Detection* ketika dijalankan pada kondisi lingkungan yang bervariasi serta sebagai referensi untuk para *developer* dalam merancang sistem AR yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan penggunaanya.

2 Tinjauan Literatur

Markerless AR memungkinkan penempatan objek virtual ke dalam dunia nyata tanpa harus menggunakan *marker* fisik melalui proses pemahaman lingkungan sekitar berbasis informasi visual yang didapat dari sensor dan kamera perangkat. Kemampuan *Markerless tracking* umumnya didukung oleh *Software Development Kit (SDK) ARCore* maupun *ARKit* pada paket *AR Foundation* yang tersedia di Unity, hal ini dipilih karena SDK tersebut mendukung pelacakan perangkat serta pelacakan bidang (*Plane Detection*) sebagai dasar penempatan objek virtual [5]. Pendekatan *Markerless AR* juga memanfaatkan *Visual Simultaneous Localization and Mapping (V-SLAM)* yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi lingkungan sekitar serta memperkirakan posisi perangkat untuk penempatan objek virtual [6]. Dengan begitu, kemampuan sistem dalam memahami kondisi bidang menjadi suatu komponen penting agar objek virtual dapat ditempatkan dan dipertahankan secara stabil pada lingkungan nyata, sebagaimana ditunjukkan pada penelitian [12] mengenai stabilitas objek virtual pada *Markerless AR*. Oleh karena itu, evaluasi mengenai performa *Plane Detection* menjadi penting karena mekanisme tersebut berperan sebagai dasar penempatan bagi objek virtual sebelum pengaruh faktor lingkungan, seperti karakteristik permukaan dan intensitas cahaya dianalisis lebih lanjut.

Performa *Plane Detection* tidak hanya dipengaruhi oleh mekanisme deteksi bidang, tetapi juga oleh kualitas informasi visual dari lingkungan sekitar. Salah satu faktor yang mempengaruhi informasi visual tersebut adalah karakteristik permukaan. Penelitian yang dilakukan [10] menunjukkan bahwa bidang dengan karakteristik yang kurang jelas menghasilkan jumlah *feature points* yang lebih sedikit sehingga proses deteksi bidang menjadi kurang optimal. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian lain menunjukkan bahwa kompleksitas tekstur lingkungan dapat memengaruhi distribusi *feature points* pada sistem *Markerless AR* [13]. Selain karakteristik permukaan, perubahan intensitas cahaya lingkungan sekitar juga dilaporkan dapat memengaruhi proses *feature detection* dan *feature tracking* sehingga dapat menurunkan ketahanan sistem pelacakan berbasis *Visual Simultaneous Localization and Mapping (V-SLAM)* [14], [15]. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik permukaan dan intensitas cahaya telah dikaji sebagai faktor yang memengaruhi kualitas visual, namun pengaruh kedua faktor tersebut terhadap performa *Plane Detection* pada *AR Foundation* belum menjadi fokus pembahasan secara langsung.

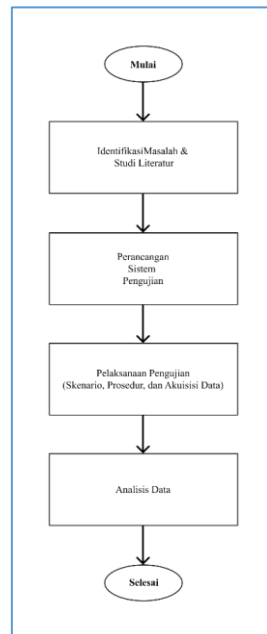
Penelitian terdahulu menggunakan pendekatan yang berbeda sesuai dengan aspek sistem yang menjadi fokus kajiannya. Penelitian Kim dan Woo [16] mengevaluasi performa *Plane Detection* menggunakan metrik *Recall*, *Precision*, *Coverage*, *Incorrect Coverage*, dan *Root Mean Square Error (RMSE)* untuk menilai kualitas bidang yang berhasil terdeteksi. Sementara itu, penelitian [5] lebih berfokus pada evaluasi akurasi dan stabilitas penempatan objek virtual melalui pengukuran *RMSE* dan *Standard Deviation*. Penelitian lain mengevaluasi sistem *Markerless AR* menggunakan stabilitas penempatan objek virtual pada berbagai kondisi visual sebagai indikator performa pengalaman pengguna [12]. Perbedaan objek dan parameter evaluasi tersebut menunjukkan bahwa setiap penelitian menyesuaikan metrik dengan tujuan penelitian yang dilakukan. Namun, penelitian yang secara khusus mengkaji evaluasi performa *Plane Detection* pada *AR Foundation* berdasarkan kombinasi karakteristik variasi permukaan dan intensitas cahaya masih belum menjadi fokus pembahasan pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, penelitian-penelitian terdahulu telah membahas berbagai aspek yang berkaitan dengan sistem *Markerless AR* mulai dari mekanisme *Plane Detection*, pengaruh karakteristik permukaan terhadap informasi visual yang diperoleh serta pengaruh perubahan intensitas cahaya terhadap proses *feature detection* dan *tracking*. Meskipun *Plane Detection* merupakan komponen penting pada sistem *Markerless AR*, penelitian terdahulu umumnya membahas sistem ini sebagai bagian dari mekanisme *V-SLAM*, sehingga penelitian yang secara khusus mengevaluasi performanya sebagai kajian objek utama masih terbatas. Sehingga, penelitian-penelitian tersebut belum memberikan gambaran mengenai performa *Plane Detection* pada variasi

karakteristik permukaan dan intensitas cahaya dalam satu kerangka evaluasi pada sistem *Markerless AR*.

3 Metode Penelitian

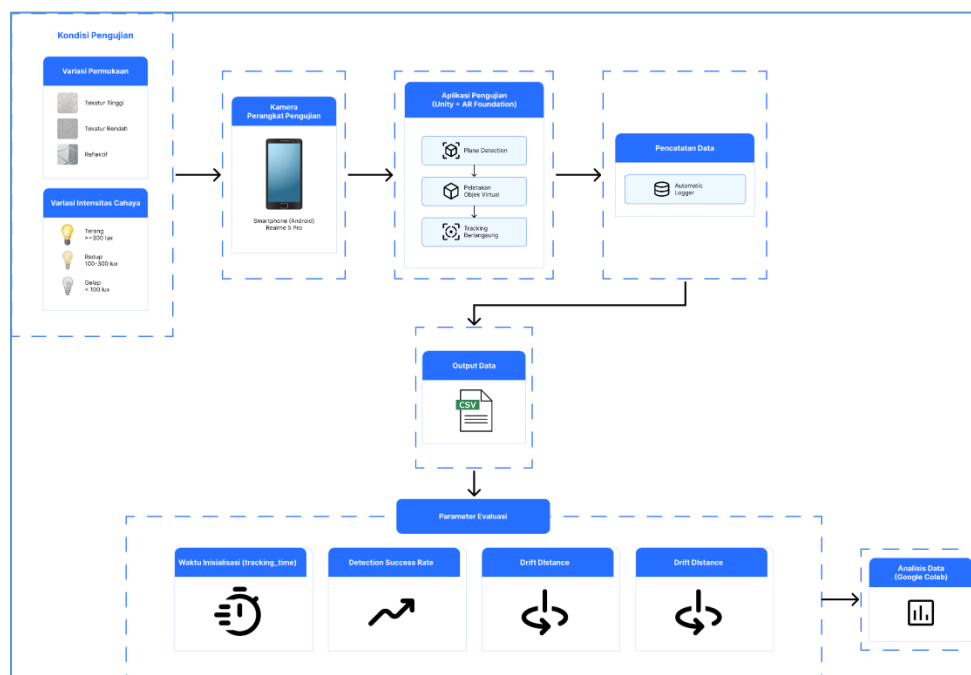
3.1 Alur Penelitian



Gambar 1 Alur penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa *Plane Detection* pada *Augmented Reality Markerless* berbasis Unity terhadap variasi permukaan dan intensitas cahaya. Pengujian dilakukan dengan mengkombinasikan beberapa karakteristik permukaan dan intensitas cahaya, di mana data hasil pengujian akan direkam dan disimpan secara otomatis dalam format CSV untuk dianalisis menggunakan *Google Colab*. Tahapan penelitian ini mencakup identifikasi masalah dan studi literatur, perancangan sistem pengujian, pelaksanaan pengujian, dan analisis data sebagaimana disajikan pada Gambar 1 *Alur Penelitian*.

3.2 Arsitektur Sistem



Gambar 2 Arsitektur sistem

Sistem pengujian pada penelitian ini dirancang untuk menghasilkan data yang akan digunakan untuk mengevaluasi performa Plane Detection pada sistem Markerless AR. Arsitektur sistem yang ditunjukkan Gambar 2 *Arsitektur Sistem* yang meliputi persiapan kondisi pengujian, pelaksanaan pengujian menggunakan smartphone, pencatatan data melalui aplikasi pengujian, hingga tahap analisis.

Pengujian dilakukan menggunakan aplikasi pengujian yang dikembangkan menggunakan Unity versi 6.1 dan *AR Foundation* versi 6.1.1 untuk melakukan *Plane Detection*, menempatkan objek virtual pada bidang yang sudah terdeteksi serta mempertahankan proses tracking selama proses pengujian berlangsung. Aplikasi pengujian dilengkapi dengan sistem *logger* yang secara otomatis merekam data ke dalam CSV tanpa harus mencatat secara manual.

Berkas CSV tersebut kemudian akan dianalisis menggunakan *Google Colab* untuk mengekstraksi empat parameter evaluasi, yaitu *Tracking Time*, *Detection Success Rate*, *Drift Distance* dan *Coverage Area*. Keempat parameter tersebut digunakan sebagai landasan untuk mengevaluasi performa *Plane Detection* pada setiap kombinasi variasi permukaan dan intensitas cahaya.

3.3 Pelaksanaan Pengujian

Pelaksanaan pengujian dilakukan untuk memperoleh data performa *Plane Detection* pada berbagai kombinasi variasi permukaan dan intensitas cahaya. Kedua variabel ini dipilih karena berpengaruh terhadap informasi visual yang diterima kamera pada sistem *Markerless AR* dalam proses *Plane Detection* [10], [14]. Variabel yang digunakan terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 1 *Variabel Pengujian*. Karakteristik permukaan diklasifikasikan berdasarkan pola, tekstur, serta tingkat reflektifitas permukaan yang teramati secara visual, untuk merepresentasikan kondisi visual yang berbeda. Seluruh pengujian pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat, aplikasi, posisi kamera, dan prosedur yang sama sehingga perbedaan hasil dari tiap skenario pengujian hanya dipengaruhi oleh variasi kondisi pengujian.

Pengujian dilakukan menggunakan perangkat smartphone Realme 5 Pro dengan sistem operasi Android 11, prosesor Snapdragon 712, RAM 4 GB, dan kamera belakang 48 MP sebagai perangkat Utama untuk menjalankan aplikasi pengujian. Aplikasi pengujian dikembangkan menggunakan Unity versi 6.1 dan *AR Foundation* 6.1.1. Intensitas cahaya diukur menggunakan lux meter Smart Sensor dengan rentang pengukuran 0-200.000 lux, resolusi 1 lux, dan akurasi $\pm 5\%$ rdg ± 10 dgt. Kondisi pencahayaan yang digunakan terdiri dari kondisi terang sebesar 454 lux, kondisi redup sebesar 182 lux dan kondisi gelap sebesar 3 lux.

Tabel 1 Variabel pengujian

Jenis Variabel	Variabel	Keterangan
Bebas	Karakteristik Permukaan	Bertekstur Tinggi, Bertekstur Rendah, Reflektif
	Intensitas Cahaya	Terang, Redup, Gelap
Terikat	<i>Tracking Time</i>	Waktu yang diperlukan sistem untuk mendeteksi bidang pertama
	<i>Detection Success Rate</i>	Tingkat kesuksesan sistem mendeteksi bidang
	<i>Drift Distance</i>	Pergeseran objek virtual selama proses <i>tracking</i>
	<i>Coverage Area</i>	Persentase luas zona uji yang berhasil terdeteksi sebagai bidang
Kontrol	<i>Smartphone</i>	Tetap
	Aplikasi pengujian	Tetap
	Versi Unity dan <i>AR Foundation</i>	Tetap
	Posisi kamera	Tetap (menggunakan tripod)
	Jarak kamera terhadap bidang	Tetap
	Ukuran objek virtual	Tetap

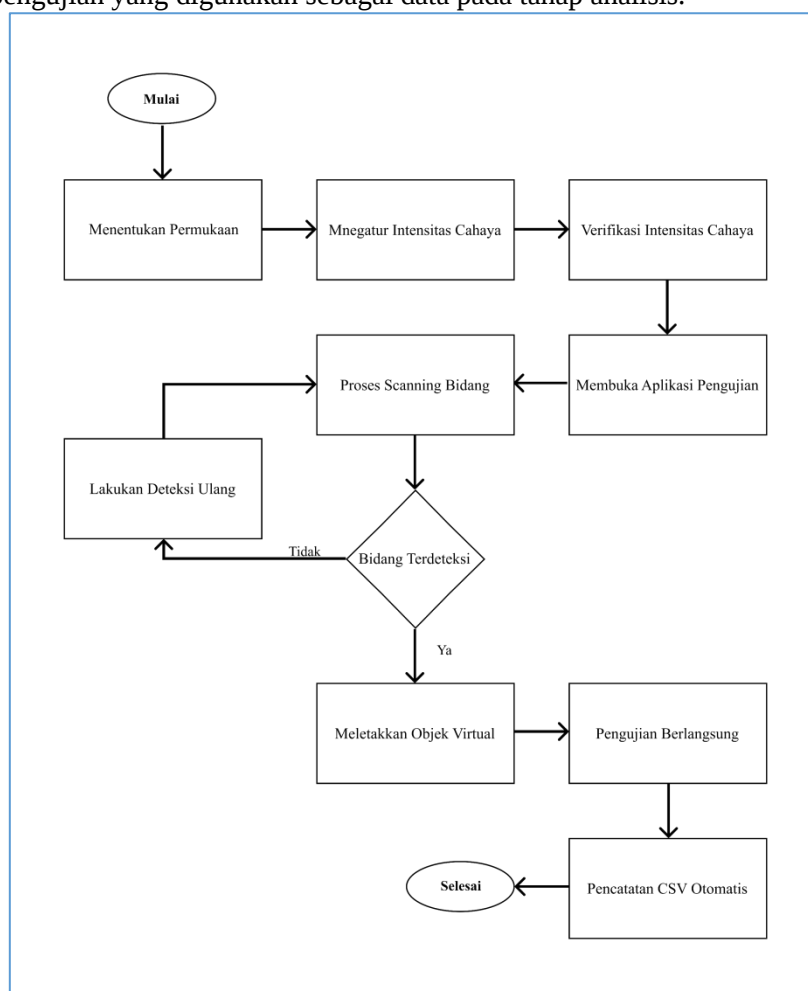
Durasi pengujian

Tetap

Tabel 2 Skenario pengujian

Kode	Karakteristik Permukaan	Intensitas Cahaya
S1	Bertekstur Tinggi	Terang
S2	Bertekstur Tinggi	Redup
S3	Bertekstur Tinggi	Gelap
S4	Bertekstur Rendah	Terang
S5	Bertekstur Rendah	Redup
S6	Bertekstur Rendah	Gelap
S7	Reflektif	Terang
S8	Reflektif	Redup
S9	Reflektif	Gelap

Kombinasi dua variabel bebas ini menghasilkan sembilan skenario pengujian (S1 – S9), seperti yang terlihat pada Tabel 2 *Skenario Pengujian*. Setiap skenario pengujian akan diulang sebanyak lima kali untuk meningkatkan konsistensi hasil pengujian. Dari sembilan skenario tersebut, diperoleh sebanyak 45 sesi pengujian yang digunakan sebagai data pada tahap analisis.



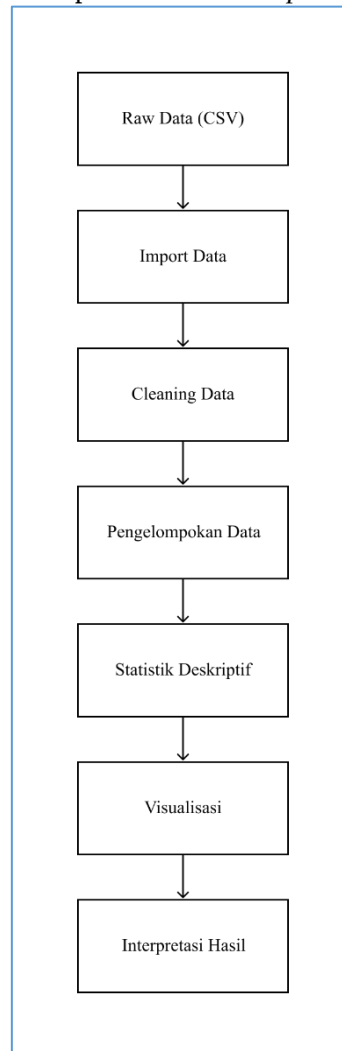
Gambar 3 Prosedur pengujian

Prosedur pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 *Prosedur Pengujian*. Sebelum melakukan proses pengujian, peneliti menyiapkan kondisi permukaan dan intensitas cahaya sesuai skenario, serta melakukan gerakan pemindaian secara perlahan untuk membantu sistem memperoleh informasi visual yang cukup sehingga mendeteksi bidang datar dapat terdeteksi [17]. Setelah bidang terdeteksi dan objek virtual ditempatkan, proses *tracking* akan

dilakukan selama 30 detik dan seluruh data hasil dari pengujian akan direkam secara otomatis ke dalam berkas CSV untuk dianalisis lebih lanjut.

3.4 Analisis Data

Data hasil pengujian yang tercatat pada CSV selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi performa *Plane Detection* pada setiap skenario pengujian. Proses analisis nantinya akan menggunakan *Google Colab* dengan memanfaatkan data mentah yang diperoleh melalui *automatic data logger*. Tahapan analisis data pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4 *Pipeline Analisis Data*.



Gambar 4 Pipeline analisis data

Tahap evaluasi dilakukan dengan mengimpor berkas CSV ke dalam *Google Colab*. Selanjutnya dilakukan proses *data cleaning* untuk memeriksa kelengkapan, konsistensi, dan validitas data sebelum dilakukan analisis, sehingga data yang digunakan sesuai dengan kondisi pengujian [18].

Data yang telah dibersihkan kemudian akan dikelompokkan berdasarkan kombinasi variasi permukaan dan intensitas cahaya pada setiap skenario pengujian. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan deskriptif berupa nilai rata-rata (*mean*), *standar deviasi*, nilai minimum, dan nilai maksimum untuk setiap parameter evaluasi [19]. Untuk parameter *Detection Success Rate*, hasil akan disajikan dalam bentuk jumlah keberhasilan, jumlah pengujian, dan persentase keberhasilan. Hasil statistik deskriptif dan visualisasinya digunakan sebagai dasar untuk menginterpretasikan performa *Plane Detection* pada tiap kombinasi permukaan dan intensitas cahaya, dengan melihat kecenderungan perubahan pada setiap parameter evaluasi. Hasil tersebut menunjukkan kondisi mana yang menghasilkan performa terbaik dan mana yang paling rendah.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Tracking Time

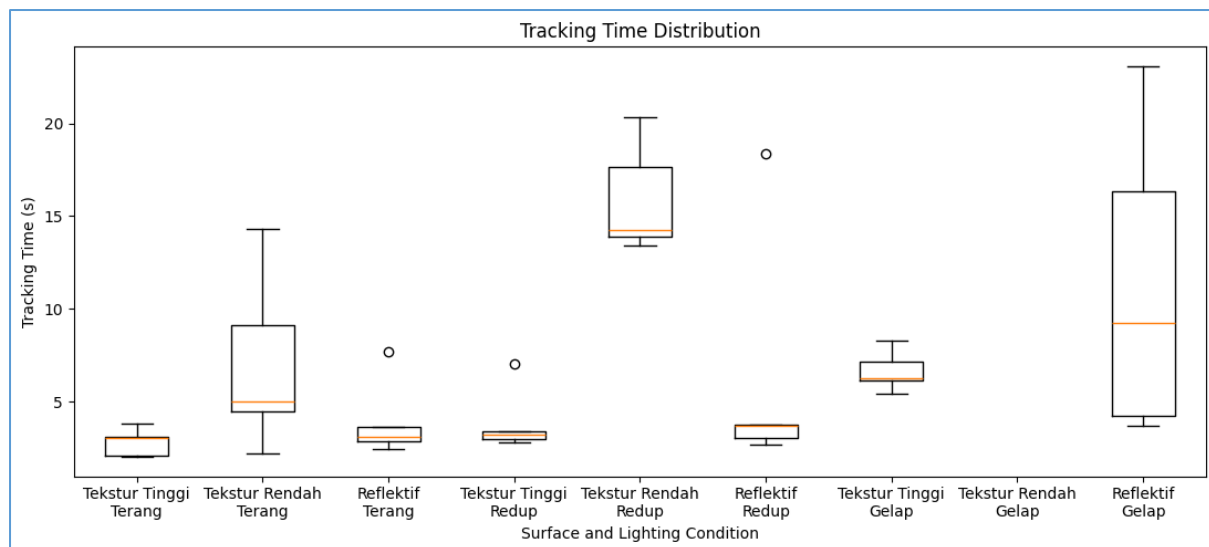
Sebagai indikator pertama yang dievaluasi pada penelitian ini, *Tracking Time* menunjukkan waktu yang dibutuhkan sistem sejak awal pemindaian dimulai untuk mengenali bidang pertama. Selengkapnya, hasil pengujian akan disajikan pada Tabel 3 *Hasil Tracking Time*, sedangkan distribusi data dan pola rata-rata *Tracking Time* ditunjukkan pada Gambar 5 *Boxplot Tracking Time* dan 6 *Heatmap Tracking Time*

Tabel 3 Hasil tracking time

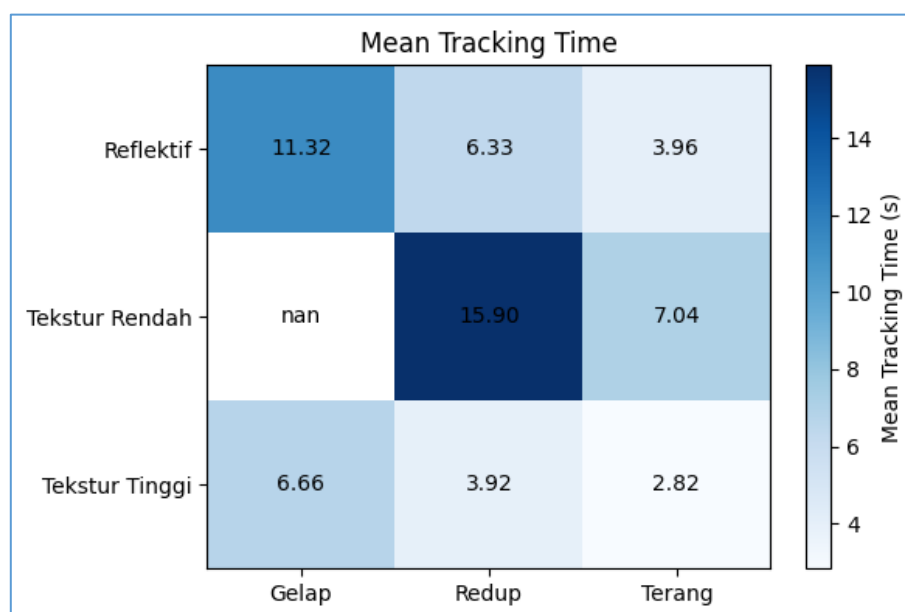
No	Permukaan	Pencahayaan	Mean (s)	Std (s)	Min (s)	Max (s)
0	Tekstur Tinggi	Terang	2.82	0.75	2.05	3.82
1	Tekstur Tinggi	Redup	3.92	1.78	2.84	7.07
2	Tekstur Tinggi	Gelap	6.66	1.10	5.45	8.32
3	Tekstur Rendah	Terang	7.04	4.76	2.25	14.30
4	Tekstur Rendah	Redup	15.90	2.98	13.40	20.30
5	Tekstur Rendah	Gelap	-	-	-	-
6	Reflektif	Terang	3.96	2.13	2.45	7.69
7	Reflektif	Redup	6.33	6.76	2.70	18.39
8	Reflektif	Gelap	11.32	9.15	3.70	23.07

Permukaan dengan tekstur tinggi menghasilkan *Tracking Time* paling rendah di seluruh kombinasi pengujian, dengan rata-rata 2.82 detik pada kondisi terang hingga 6.66 detik pada kondisi gelap. Peningkatan *Tracking Time* pada permukaan tekstur tinggi berlangsung bertahap seiring dengan penurunan intensitas cahaya dan tetap lebih rendah dibanding dua jenis permukaan lainnya. Sementara itu, nilai *standar deviasi* yang kecil pada setiap kondisi pencahayaan mengindikasikan performa deteksi yang stabil. Pola berbeda muncul pada permukaan bertekstur rendah, *Tracking Time* naik dari 7.04 detik pada kondisi terang menjadi 15.90 detik pada kondisi redup, sedangkan pada kondisi gelap sistem gagal mendeteksi bidang sama sekali sehingga nilai *Tracking Time* pada kondisi ini tidak dapat dihitung. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa karakteristik permukaan memengaruhi sistem dalam mengenali bidang, di mana permukaan dengan tekstur yang lebih kaya dapat memberikan informasi visual yang lebih baik sehingga sistem dapat mengekstraksi *feature points* secara lebih cepat dan mempertahankan proses *tracking* hingga bidang berhasil dikenali. Sedangkan permukaan bertekstur rendah dapat membatasi informasi tersebut sehingga sistem memerlukan waktu deteksi yang lebih lama untuk mengenali bidang.

Pada permukaan reflektif, *Tracking Time* meningkat secara konsisten dari 3.96 detik pada kondisi terang menjadi 6.33 detik pada kondisi redup hingga mencapai 11.32 detik pada kondisi gelap. Pola ini berbeda dibanding dengan permukaan bertekstur tinggi yang masih mempertahankan proses *tracking* secara bertahap ketika intensitas cahaya menurun. *Boxplot* pada Gambar 5 *Boxplot Tracking Time* turut memperlihatkan sebaran data *Tracking Time* permukaan reflektif pada kondisi gelap sebagai yang terbesar di antara seluruh skenario pengujian yang lain. Hal ini menandakan performa deteksi pada permukaan reflektif tidak hanya menjadi lebih lambat, tetapi juga kurang konsisten ketika pantulan cahaya mendominasi informasi visual yang diterima kamera. Dengan demikian, pengaruh *Tracking Time* bergantung pada karakteristik permukaan yang diamati.



Gambar 5 Boxplot *tracking time*



Gambar 6 Heatmap *tracking time*

Heatmap pada Gambar 6 *Heatmap Tracking Time* memperlihatkan pola rata-rata *Tracking Time* pada setiap kombinasi karakteristik permukaan dan intensitas cahaya. Secara keseluruhan, pengaruh intensitas cahaya terhadap *Tracking Time* bergantung pada karakteristik permukaan yang diuji. Permukaan bertekstur tinggi tetap mempertahankan waktu deteksi yang relatif rendah pada seluruh kondisi pencahayaan karena informasi visual yang didapat cukup untuk menghasilkan *feature points* yang stabil, sehingga estimasi pembentukan bidang berlangsung lebih cepat dan konsisten. Pada permukaan bertekstur rendah keterbatasan informasi visual mengurangi jumlah *feature points* yang dapat diekstraksi, sehingga memakan waktu yang lebih lama untuk mengenali bidang, bahkan gagal dalam mendeteksi pada kondisi gelap. Pola berbeda terlihat pada permukaan reflektif, di mana bidang masih dapat terdeteksi, tetapi pantulan cahaya membuat informasi visual yang diterima kamera tidak konsisten. Akibatnya, *feature points* yang diamati sistem menjadi kurang stabil selama proses *tracking* dan menghasilkan waktu deteksi yang lebih lama dan performa yang kurang konsisten dibandingkan permukaan bertekstur tinggi. Dengan kata lain, penurunan performa pada permukaan bertekstur rendah lebih disebabkan oleh keterbatasan jumlah *feature points*, sedangkan permukaan reflektif disebabkan oleh ketidakstabilan *feature points* akibat pantulan cahaya. Temuan ini sejalan dengan penelitian Li et al. [10] yang menunjukkan bahwa permukaan dengan informasi visual yang

kurang jelas menghasilkan *feature points* yang lebih sedikit, serta penelitian Wu et al. [14] yang menyebutkan bahwa perubahan intensitas cahaya dapat mempengaruhi kualitas *feature points* pada sistem berbasis V-SLAM.

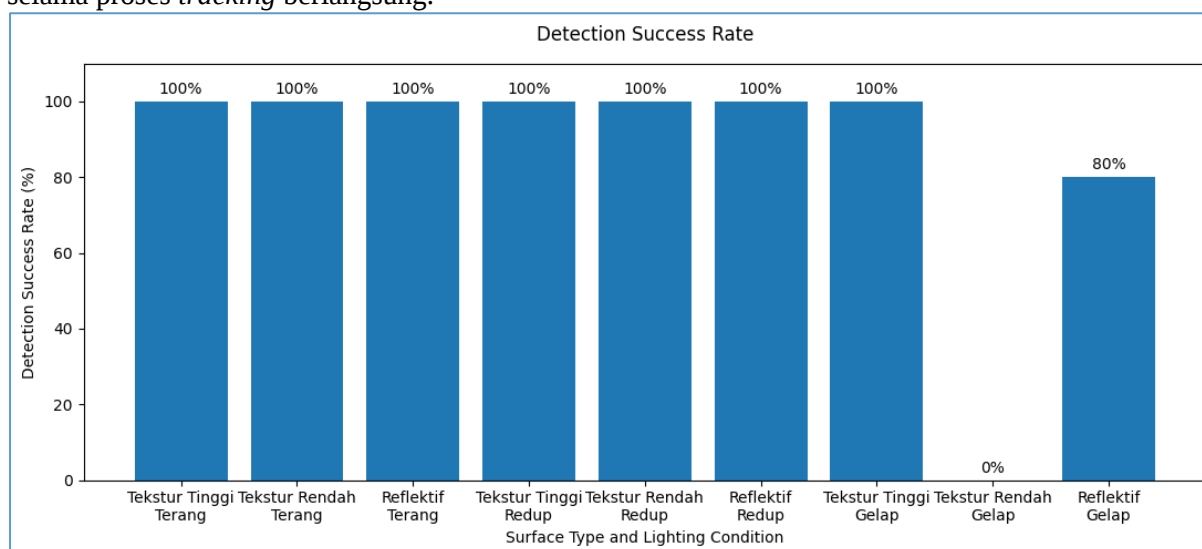
4.2 Detection Success Rate

Mengevaluasi *Tracking Time* saja belum cukup untuk menggambarkan performa sistem, karena waktu deteksi akan benar-benar berguna jika bidang benar-benar berhasil dikenali. *Detection Success Rate* mengukur aspek tersebut dengan menunjukkan tingkat keberhasilan sistem dalam mendeteksi bidang pertama pada setiap kombinasi karakteristik permukaan dan intensitas cahaya, dengan ringkasan hasil pada Tabel 4 *Hasil Detection Success Rate* dan perbandingan antar skenario pada Gambar 7 *Bar Chart Detection Success Rate*.

Tabel 4 Hasil detection success rate

No	Permukaan	Pencahayaayaan	Sukses	Total Uji	Success Rate (%)
1	Tekstur Tinggi	Terang	5	5	100%
2	Tekstur Tinggi	Redup	5	5	100%
3	Tekstur Tinggi	Gelap	5	5	100%
4	Tekstur Rendah	Terang	5	5	100%
5	Tekstur Rendah	Redup	5	5	100%
6	Tekstur Rendah	Gelap	0	5	-
7	Reflektif	Terang	5	5	100%
8	Reflektif	Redup	5	5	100%
9	Reflektif	Gelap	4	5	80%

Permukaan bertekstur tinggi mampu mempertahankan *Detection Success Rate* 100% bahkan pada kondisi pencahayaan gelap karena informasi visual yang diterima cukup untuk menjaga proses *tracking* hingga bidang berhasil dikenali, sejalan dengan hasil pada Subbab 4.1 *Tracking Time* yang hanya menunjukkan perlambatan waktu deteksi tanpa kegagalan. Berbeda dengan permukaan bertekstur rendah yang paling sensitif dengan penurunan intensitas cahaya, di mana seluruh pengujian pada kondisi gelap mengalami kegagalan dalam mendeteksi bidang. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya informasi visual yang digunakan untuk mengekstraksi *feature points*, sehingga sistem gagal dalam membentuk bidang di seluruh pengujian pada kondisi gelap. Berbeda dengan dua kondisi sebelumnya, pada permukaan reflektif bidang masih memungkinkan untuk terdeteksi pada sebagian besar pengujian. Namun, pada kondisi pengujian dengan intensitas cahaya gelap, akurasi *Detection Success Rate* turun menjadi 80% karena sistem mengalami kegagalan deteksi sebanyak satu kali. Hal ini disebabkan oleh pantulan cahaya yang menyebabkan penurunan kestabilan ekstraksi *feature points* selama proses *tracking* berlangsung.



Gambar 7 Bar chart detection success rate



Gambar 8a Hasil pengujian berhasil



Gambar 8b Hasil pengujian gagal

Perbedaan hasil deteksi turut teramati secara visual selama pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Pada permukaan bertekstur tinggi dengan intensitas cahaya terang (454 lux), sistem berhasil membentuk bidang dan menempatkan objek virtual secara stabil yang ditunjukkan pada Gambar 8a *Hasil Pengujian Berhasil*, sedangkan pada bertekstur rendah dengan intensitas cahaya gelap (3 lux) yang ditunjukkan pada Gambar 8b *Hasil Pengujian Gagal*, sistem gagal membentuk bidang maupun menempatkan objek virtual karena informasi visual yang tersedia tidak mencukupi untuk mengekstraksi *feature points* yang diperlukan dalam proses *Plane Detection*.

Hal ini sejalan dengan hasil pada Subbab 4.1 *Tracking Time* di mana kondisi ini membutuhkan waktu deteksi yang lebih lama (11.32 detik) dan memiliki variasi data terbesar pada seluruh skenario. Temuan ini sejalan dengan temuan [10] dan [14] mengenai peran karakteristik permukaan dan intensitas cahaya terhadap kualitas dan kestabilan *feature points* pada sistem berbasis V-SLAM.

4.3 Drift Distance

Setelah mengevaluasi keberhasilan sistem dalam mendeteksi bidang, tahap selanjutnya adalah mengevaluasi seberapa stabil posisi objek virtual dapat dipertahankan selama proses *tracking* berlangsung. Perlu dicatat bahwa *Drift Distance* dapat diukur jika sistem berhasil mendeteksi bidang, sehingga skenario pengujian yang mengalami kegagalan deteksi tidak memiliki nilai pada metrik ini. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 5 *Hasil Drift Distance*, dengan distribusi dan pola rata-rata data ditunjukkan pada Gambar 9 *Boxplot Drift Distance* dan Gambar 10 *Heatmap Drift Distance*

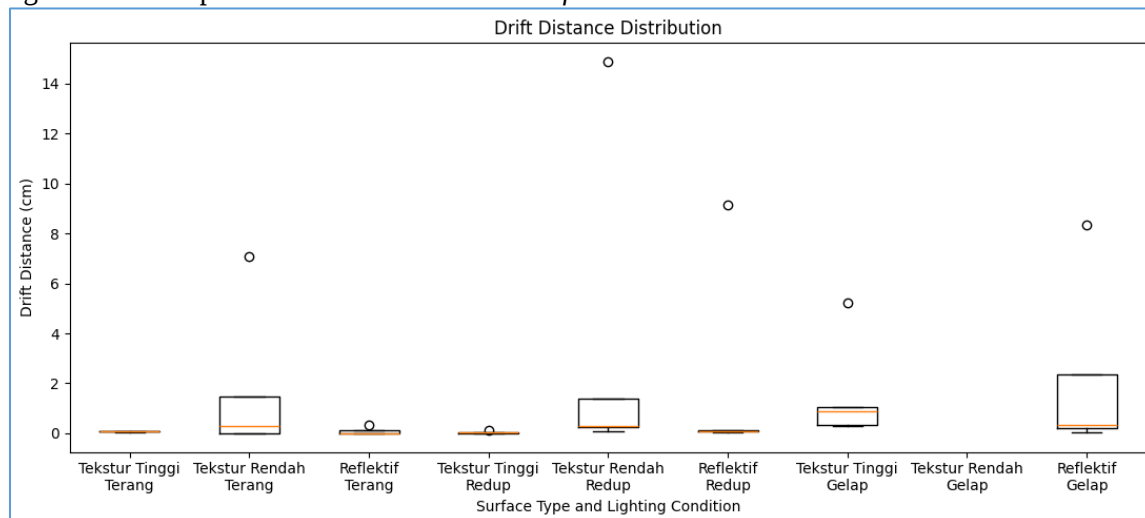
Tabel 5 Hasil drift distance

No	Permukaan	Pencahayaannya	Mean	Std	Min	Max
0	Tekstur Tinggi	Terang	0.08	0.02	0.05	0.10
1	Tekstur Tinggi	Redup	0.04	0.05	0.01	0.13
2	Tekstur Tinggi	Gelap	1.55	2.08	0.27	5.23
3	Tekstur Rendah	Terang	1.76	3.02	0.00	7.06
4	Tekstur Rendah	Redup	3.38	6.45	0.10	14.88
5	Tekstur Rendah	Gelap	-	-	-	-
6	Reflektif	Terang	0.09	0.14	0.00	0.33
7	Reflektif	Redup	1.89	4.05	0.05	9.13
8	Reflektif	Gelap	2.26	4.06	0.05	8.35

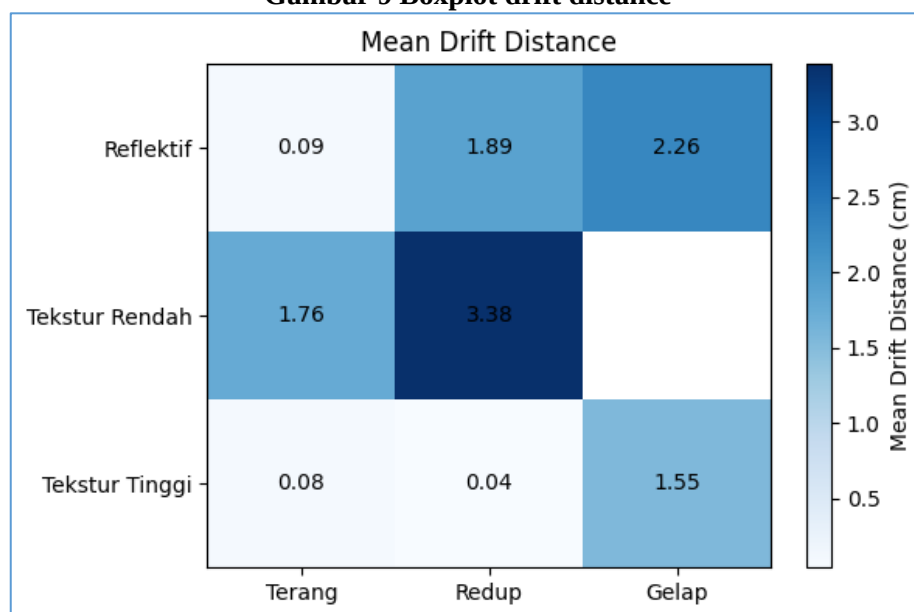
Permukaan dengan tekstur tinggi menghasilkan *Drift Distance* paling rendah pada seluruh kondisi pencahayaan, dengan rata-rata 0.08 cm pada kondisi terang dan 0.04 cm pada kondisi redup. Perbedaan antara kedua kondisi ini relatif kecil, sedangkan perbedaan terbesar terlihat pada kondisi gelap dengan rata-rata 1.55 cm. Namun, nilai tersebut tetap lebih rendah dibanding dua jenis permukaan lainnya. Pada permukaan bertekstur rendah, rata-rata meningkat dari 1.76 cm pada kondisi terang menjadi 3.38 cm pada kondisi redup, dengan nilai maksimum *drift* di kedua kondisi ini yang mencapai 7.06 cm dan 14.88 cm. Peningkatan nilai rata-rata dan rentang maksimum tersebut menunjukkan bahwa nilai *Drift Distance* menjadi lebih besar dan bervariasi seiring dengan penurunan intensitas cahaya. Seluruh pengujian pada kondisi gelap mengalami kegagalan dalam mendeteksi bidang sehingga *Drift Distance* tidak dapat dihitung.

Rata-rata *Drift Distance* pada permukaan reflektif mengalami peningkatan secara bertahap dan relatif konsisten dari 0.09 cm pada kondisi terang menjadi 1.89 cm pada kondisi redup dan 2.26 cm

pada kondisi gelap, pola ini lebih konsisten dibanding dengan permukaan bertekstur tinggi dan rendah. Namun, seperti yang terlihat pada 9 *Boxplot Drift Distance*, pada kondisi redup dan gelap menunjukkan sebaran data yang lebih besar, dengan *standar deviasi* yang bahkan melebihi nilai rata-ratanya (4.05 cm dan 4.06 cm) serta nilai maksimum yang mencapai 9.13 cm dan 8.35 cm, hal ini mengindikasikan bahwa posisi objek virtual menjadi kurang konsisten pada kondisi pencahayaan yang minim meskipun rata-rata kenaikan nilai *drift* relatif konsisten.



Gambar 9 Boxplot drift distance



Gambar 10 Heatmap drift distance

Secara keseluruhan, kestabilan *feature points* selama proses *tracking* menjadi faktor penentu utama besarnya nilai *Drift Distance*. Permukaan bertekstur tinggi mampu mempertahankan *feature points* dengan stabil, sehingga peningkatan pergeseran objek virtual tetap minim bahkan ketika intensitas cahaya menurun. Pada permukaan bertekstur rendah, keterbatasan *feature points* membuat proses *tracking* menjadi tidak konsisten dan akhirnya mengalami gagal total pada kondisi gelap. Pada permukaan reflektif, pantulan cahaya yang dihasilkan menyebabkan *feature points* berubah-ubah selama proses *tracking*, hal ini menghasilkan variasi *drift* yang sangat besar. Dengan lima pengulangan per skenario, nilai rata-rata pada kondisi bervariasi tinggi turut dipengaruhi oleh nilai ekstrem pada sebagian pengulangan, sehingga interpretasinya perlu mempertimbangkan keseluruhan sebaran data. Temuan ini sejalan dengan penelitian Barhoumi et al. [5] dan Scargill et al. [12] mengenai peran stabilitas *feature points* terhadap akurasi penempatan objek virtual pada sistem *Markerless AR*.

4.4 Coverage Area

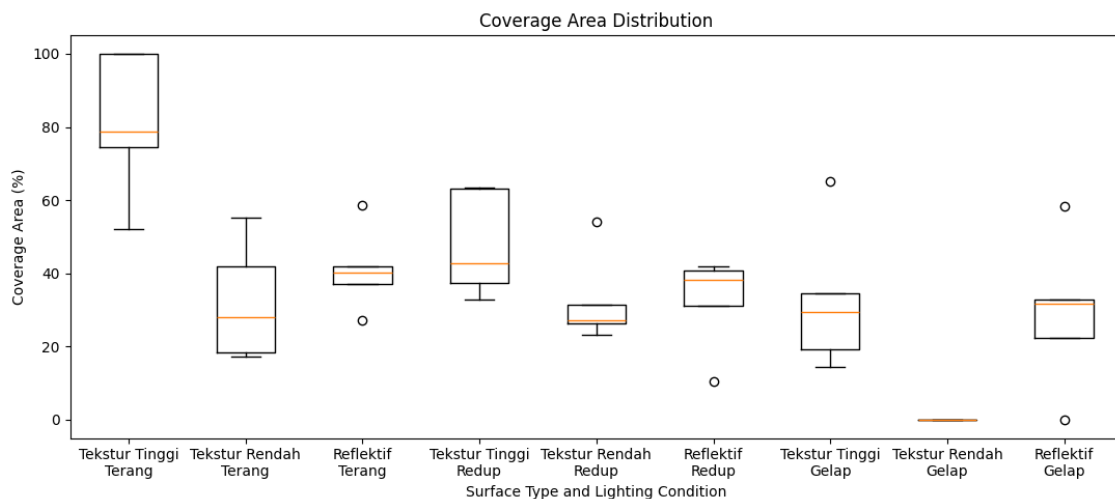
Coverage Area pada penelitian ini berguna untuk mengukur seberapa luas bidang yang berhasil dipetakan sistem sebelum objek virtual ditempatkan, nilai pada *Coverage Area* ini sama seperti *Drift Distance* yang hanya tersedia pada sesi pengujian yang berhasil mendeteksi bidang. Sehingga pada kombinasi permukaan bertekstur rendah dan intensitas cahaya gelap di mana seluruh pengujian pada kombinasi ini mengalami kegagalan sehingga tidak memiliki nilai pada metrik ini. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 6 *Hasil Coverage Area*, dengan distribusi data ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 11 *Hasil Boxplot Coverage Area* dan Gambar 12 *Hasil Heatmap Coverage Area*.

Tabel 6 Hasil coverage area

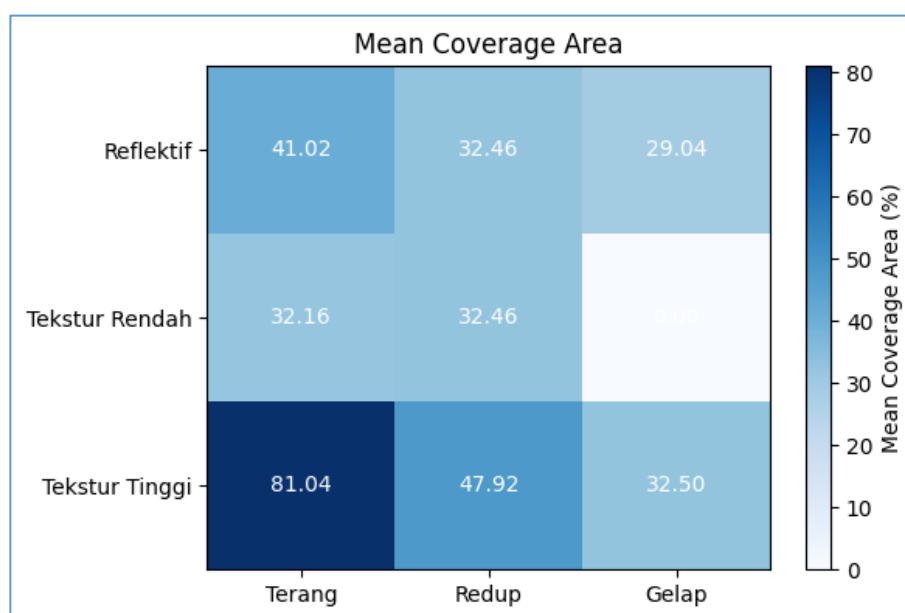
No	Permukaan	Pencahayaannya	Mean	Std	Min	Max
0	Tekstur Tinggi	Terang	81.04	20.00	52.2	100.0
1	Tekstur Tinggi	Redup	47.92	14.43	32.9	63.3
2	Tekstur Tinggi	Gelap	32.5	19.88	14.4	65.1
3	Tekstur Rendah	Terang	32.16	16.19	17.2	55.1
4	Tekstur Rendah	Redup	32.46	12.39	23.3	54.0
5	Tekstur Rendah	Gelap	-	-	-	-
6	Reflektif	Terang	41.02	11.36	27.2	58.6
7	Reflektif	Redup	32.46	12.98	10.5	41.8
8	Reflektif	Gelap	29.04	20.97	0.00	58.2

Penurunan *Coverage Area* paling tajam ditunjukkan pada permukaan bertekstur tinggi seiring dengan penurunan intensitas cahaya, dari 81.04% pada kondisi terang menjadi 47.92% pada kondisi redup, dan 32.50% pada kondisi gelap. Penurunan nilai *Coverage Area* dari kondisi terang ke gelap lebih dari separuh, meski nilainya tetap tertinggi pada tiap kondisi pencahayaan yang sama. Permukaan bertekstur rendah menunjukkan *Coverage Area* yang relatif stabil 32.16% pada kondisi terang dan 32.46% pada kondisi redup, sebelum mengalami kegagalan deteksi bidang pada kondisi gelap. Sedangkan permukaan reflektif mengalami penurunan nilai *Coverage Area* secara bertahap dari 41.02% pada kondisi terang menjadi 32.46% pada kondisi redup dan 29.04% pada kondisi gelap. Pola ini menunjukkan bahwa kurangnya intensitas cahaya mengakibatkan penurunan nilai *Coverage Area* pada tiap jenis permukaan.

Sebaran data yang ditunjukkan Gambar 11 *Hasil Boxplot Coverage Area* menunjukkan variabilitas yang tidak seragam di tiap-tiap skenarionya dan cenderung ekstrem pada kondisi pencahayaan minim. Permukaan reflektif menunjukkan variabilitas tertinggi di seluruh data hasil pengujian, dengan *standar deviasinya* 20.97% dari *mean* yang hanya 29.04% serta rentang nilai dari 0% sampai 58.2%. Hal ini mengindikasikan performa sistem cenderung tidak konsisten. Pada beberapa pengujian, *Coverage Area* yang dihasilkan sangat rendah, sedangkan pada kondisi pencahayaan terang *Coverage Area* yang dihasilkan mendekati nilai dari *mean*. Meski tidak seekstrem pada kondisi sebelumnya, pola serupa terlihat pada permukaan bertekstur tinggi dengan kondisi gelap dengan nilai *mean* 32.50%, *standar deviasi* 19.88% dan rentang nilainya 14.4% hingga 65.1%. Pada permukaan yang bertekstur rendah, nilai *Coverage Area* cenderung tetap stabil ketika kondisinya terang hingga redup. Namun, pada kondisi gelap nilai *Coverage Area* menurun menjadi 0% pada kondisi pencahayaan gelap karena pada seluruh pengujian dalam skenario tersebut mengalami kegagalan.



Gambar 11 Hasil boxplot coverage area



Gambar 12 Hasil heatmap coverage area

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *Coverage Area* merupakan konsekuensi dari keberhasilan sistem dalam mempertahankan proses *tracking* hingga bidang berhasil dipetakan. Oleh karena itu, metrik ini tidak dapat diartikan sebagai indikator performa yang berdiri sendiri. Pada permukaan bertekstur tinggi, sistem dapat menghasilkan *Coverage Area* yang lebih besar karena mampu memperoleh *feature points* yang stabil dan mampu mempertahankan proses *tracking* dengan konsisten, meskipun cakupannya menurun cukup besar dari 81.04% pada kondisi terang menjadi 32.50% pada kondisi gelap. Sementara itu, pada permukaan bertekstur rendah, keterbatasan informasi visual membatasi *Coverage Area* yang berhasil dipetakan, bahkan sejak kondisi pencahayaan terang, dan akhirnya gagal total pada kondisi gelap. Pada permukaan yang reflektif, bidang masih dapat dipetakan, namun perubahan observasi visual akibat pantulan cahaya menghasilkan *Coverage Area* yang tidak konsisten, terutama pada kondisi gelap. Variabilitas tersebut perlu dipertimbangkan bersama jumlah pengulangan yang terbatas ($n=5$) pada setiap skenario, sehingga nilai rata-rata pada kondisi tersebut perlu dibaca bersama dengan sebaran datanya. *Coverage Area* yang lebih besar belum tentu menunjukkan performa *Plane Detection* yang lebih baik secara keseluruhan. Oleh karena itu, luas area yang berhasil dipetakan perlu diinterpretasikan bersama dengan *Tracking Time* dan *Detection Success Rate*, karena luas bidang yang lebih besar belum tentu menunjukkan performa deteksi bidang yang lebih baik secara keseluruhan. Temuan ini sejalan dengan

penelitian [16] yang turut menggunakan metrik *Coverage* dalam menilai kualitas bidang yang terdeteksi, serta penelitian [6] mengenai peran V-SLAM dalam merepresentasikan kondisi lingkungan sebagai dasar pemetaan bidang pada sistem *Markerless AR*.

5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, performa *Plane Detection* menunjukkan perbedaan pada berbagai kombinasi karakteristik permukaan dan kondisi pencahayaan yang diuji. Permukaan bertekstur tinggi menghasilkan performa yang paling stabil, dengan mencatat *Tracking Time* tercepat sebesar 2.82 detik, *Detection Success Rate* 100%, *Drift Distance* objek virtual terendah sebesar 0.04 cm hingga 1.55 cm, dan *Coverage Area* bidang tertinggi mencapai 81.04% menjadikannya lebih luas dibanding kondisi lainnya. Permukaan bertekstur rendah menunjukkan peningkatan *Tracking Time* dari 7.04 detik pada kondisi terang menjadi 15.90 detik pada kondisi redup dan mengalami kegagalan deteksi pada kondisi gelap, dengan *Detection Success Rate* sebesar 0%. Pada permukaan reflektif, *Tracking Time* meningkat dari 3.96 detik pada kondisi terang menjadi 11.32 detik pada kondisi gelap, sedangkan *Detection Success Rate* pada kondisi gelap sebesar 80% dengan *Drift Distance* mencapai 2.26 cm. Hasil tersebut menunjukkan keterbatasan *feature points* pada kondisi permukaan bertekstur rendah dan ketidakstabilan *feature points* akibat pantulan pada permukaan reflektif berkaitan dengan perbedaan performa yang diamati selama pengujian. Penelitian ini masih terbatas pada penggunaan satu *smartphone*, satu lingkungan pengujian *indoor*, lima kali pengulangan pada setiap skenario, serta klasifikasi permukaan berdasarkan pengamatan visual tanpa parameter kuantitatif seperti *surface roughness* atau *texture entropy*. Selain itu, penelitian belum mengevaluasi akurasi geometris bidang dan *false positive*. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas variasi perangkat dan lingkungan, menggunakan parameter kuantitatif dalam klasifikasi permukaan, serta menambahkan evaluasi akurasi geometri bidang dan *false positive*.

Referensi

- [1] F. Zulfiqar, R. Raza, M. O. Khan, M. Arif, A. Alvi, and T. Alam, "Augmented Reality and its Applications in Education: A Systematic Survey," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 143250–143271, 2023, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3331218.
- [2] Y. Abdurrahman and M. Azrino Gustalika, "Aplikasi *augmented reality* dengan *marker based* dan *markerless tracking* sebagai Pengenalan Budaya CANDI Mendut," *Remik: Riset dan E-Jurnal Manajemen Informatika Komputer*, Vol. 7, No. 2, pp. 859–871, Apr. 2023, DOI: 10.33395/remik.v7i2.12137.
- [3] K. S. Kartini, N. L. P. Labasariyani, M. I. S. Abenk, and I. N. T. A. Putra, "Analisis Perbandingan Efektivitas *Augmented Reality Marker-based* dan *Markerless* pada Media Pembelajaran Struktur Tumbuhan," *Digital Transformation Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 301–309, Jul. 2025, DOI: 10.47709/digitech.v5i1.6343.
- [4] L. N. Amali, M. R. Katili, A. Dwinanto, and Rasim, "Markerless Versus Marker-based Augmented Reality: Comparative Usability Insights from a Museum Context," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 15, No. 2, pp. 1770–1785, Apr. 2026, DOI: 10.11591/eei.v15i2.11286.
- [5] N. El Barhoumi, R. Hajji, Z. Bouali, Y. Ben Brahim, and A. Kharroubi, "Assessment of 3D Models Placement Methods in Augmented Reality," *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 12, No. 20, Oct. 2022, DOI: 10.3390/app122010620.
- [6] C. Theodorou, V. Velisavljevic, V. Dyo, and F. Nonyelu, "Visual SLAM Algorithms and Their Application for AR, Mapping, Localization and Wayfinding," *Array*, Vol. 15, Sep. 2022, DOI: 10.1016/j.array.2022.100222.
- [7] A. Pramudwiatmoko and R. Armanda, "Fitur Modifikasi Objek untuk Ketidakakuratan Spasial pada Aplikasi *Furnitur Markerless Augmented Reality*," *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*, Vol. 9, No. 2, p. 393, Jun. 2025, DOI: 10.26798/jiko.v9i2.1650.
- [8] I. Irawati, L. N. Hayati, and M. N. Alfath, "Aplikasi *Augmented Reality* berbasis *Plane Detection* untuk Visualisasi Objek *Furniture* Ruang," *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*, Vol. 7, No. 2, pp. 244–250, Sep. 2023, DOI: 10.26798/jiko.v7i2.801.

- [9] M. A. Maneli and O. E. Isafiade, "A Multifactor Comparative Assessment of Augmented Reality Frameworks in Diverse Computing Settings," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 12474–12486, 2023, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242238.
- [10] B. Li, X. Wang, Q. Gao, Z. Song, C. Zou, and S. Liu, "A 3D Scene Information Enhancement Method Applied in Augmented Reality," *Electronics (Switzerland)*, Vol. 11, No. 24, Dec. 2022, DOI: 10.3390/electronics11244123.
- [11] K. C. Brata, N. Funabiki, P. A. Riyantoko, Y. Y. F. Panduman, and M. Mentari, "Performance Investigations of VSLAM and Google Street View Integration in Outdoor Location-based Augmented Reality under Various Lighting Conditions," *Electronics (Switzerland)*, Vol. 13, No. 15, Aug. 2024, DOI: 10.3390/electronics13152930.
- [12] T. Scargill, G. Premasankar, J. Chen, and M. Gorlatova, "Here to Stay: A Quantitative Comparison of Virtual Object Stability in Markerless Mobile AR," in *2022 2nd International Workshop on Cyber-Physical-Human System Design and Implementation (CPHS)*, IEEE, 2022, pp. 24–29. DOI: 10.1109/CPHS56133.2022.9804545.
- [13] T. Scargill, Y. Chen, N. Marzen, and M. Gorlatova, "Integrated Design of Augmented Reality Spaces using Virtual Environments," in *Proceedings - 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 297–306. DOI: 10.1109/ISMAR55827.2022.00045.
- [14] Z. Wu, D. Li, C. Li, Y. Chen, and S. Li, "Feature Point Tracking Method for Visual SLAM based on Multi-Condition Constraints in Light Changing Environment," *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 13, No. 12, Jun. 2023, DOI: 10.3390/app13127027.
- [15] K. Xu, Y. Hao, S. Yuan, C. Wang, and L. Xie, "AirSLAM: An Efficient and Illumination-Robust Point-Line Visual SLAM System," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 41, pp. 1673–1692, 2025, DOI: 10.1109/TRO.2025.3539171.
- [16] Y. Kim and H. Woo, "Integrating a Deep Learning-based Plane Detector in Mobile AR Systems for Improvement of Plane Detection," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Mar. 2022, pp. 597–602. DOI: 10.1145/3532213.3532304.
- [17] Y. Kojima, T. Iriyama, and T. Komuro, "AR Digital Workspace using a Mobile Device," in *Proceedings - SUI 2022: ACM Conference on Spatial User Interaction*, Association for Computing Machinery, Inc, Dec. 2022. DOI: 10.1145/3565970.3567690.
- [18] A. M. Sharifnia, D. E. Kpormegbey, D. K. Thapa, and M. Cleary, "A Primer of Data Cleaning in Quantitative Research: Handling Missing Values and Outliers," *J. Adv. Nurs.*, Vol. 82, No. 1, pp. 970–975, Jan. 2026, DOI: 10.1111/jan.16908.
- [19] E. Barroga et al., "Conducting and Writing Quantitative and Qualitative Research," *J. Korean Med. SCI.*, Vol. 38, No. 37, p. e291, 2023, DOI: 10.3346/jkms.2023.38.e291.