

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

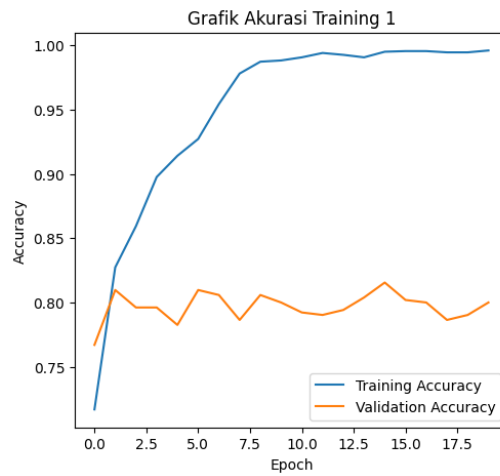
Bab ini membahas proses pengujian dan analisis terhadap sistem robot pembersih panel surya yang telah dirancang dan diimplementasikan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perangkat keras dan perangkat lunak, termasuk sistem klasifikasi citra, komunikasi antar perangkat, serta mekanisme pergerakan dan pembersihan robot. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dalam mendeteksi kondisi panel dan menjalankan proses pembersihan secara otomatis.

4.1 Evaluasi dan Analisa Hasil *Training* MobileNetV2

Evaluasi dan analisa hasil *training* dilakukan untuk menilai kinerja model MobileNetV2 dalam mengklasifikasikan kondisi permukaan panel surya ke dalam dua kelas, yaitu *clean* dan *dusty*. Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan dua skenario pelatihan, yaitu *Training 1* dengan *epoch* 20 dan *Training 2* dengan *epoch* 40, berdasarkan grafik akurasi, grafik loss, serta confusion matrix yang dihasilkan selama proses pelatihan dan validasi.

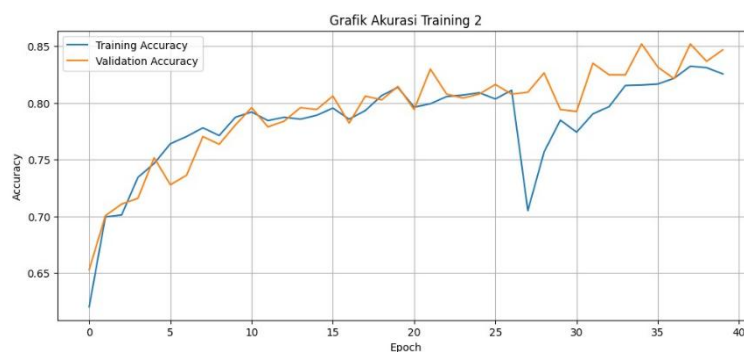
4.1.1 Grafik Akurasi *Training* dan *Validation*

Berdasarkan **Gambar 4.1** terlihat bahwa akurasi training meningkat sangat cepat hingga mendekati 100% dan kemudian stabil pada nilai yang sangat tinggi, sedangkan akurasi validasi hanya berada pada kisaran sekitar 78–82% dan cenderung berfluktuasi. Perbedaan yang cukup besar antara akurasi training dan validasi ini menunjukkan adanya *underfitting*, di mana model belum mampu mempelajari data latih dan kurang optimal dalam melakukan generalisasi terhadap data baru. Kondisi tersebut dapat disebabkan oleh jumlah epoch yang terlalu sedikit, atau kurangnya penerapan teknik regularisasi.



Gambar 4.1 Grafik Akurasi Training 1

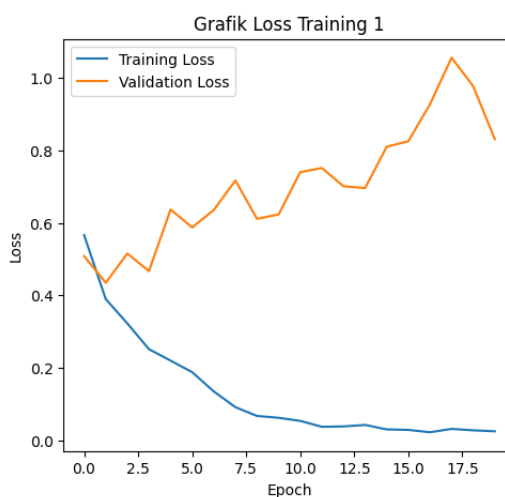
Berbeda dengan Training 1, pada **Gambar 4.2** terlihat bahwa akurasi training dan validasi meningkat secara bertahap dan cenderung berjalan beriringan dengan selisih yang relatif kecil. Meskipun sempat terjadi penurunan akurasi training di salah satu epoch, model mampu kembali stabil dan mencapai akurasi akhir yang cukup baik pada kedua metrik. Keselarasan antara kurva training dan validasi ini menunjukkan kemampuan generalisasi yang lebih baik serta risiko *underfitting* yang lebih rendah, sehingga konfigurasi pelatihan pada Training 2 dapat dikatakan lebih optimal dibandingkan Training 1.



Gambar 4.2 Grafik Akurasi Training 2

4.1.2 Grafik Loss Training dan Validation

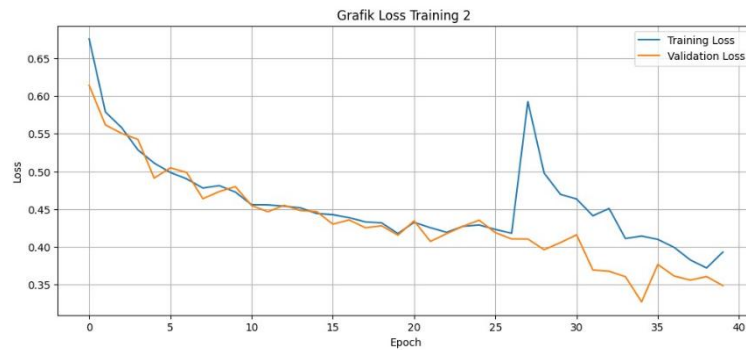
Pada **Gambar 4.3** grafik loss menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara training loss dan validation loss. Nilai training loss menurun secara tajam hingga mendekati nol seiring bertambahnya epoch, yang seharusnya menandakan bahwa model sangat baik dalam mempelajari data training. Namun, validation loss justru mengalami tren peningkatan dan fluktuasi yang cukup besar, bahkan mencapai nilai tertinggi pada epoch-epoch akhir. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya *underfitting*, di mana model gagal melakukan generalisasi terhadap data validation. Akibatnya, meskipun performa pada data training terlihat sangat baik, kemampuan model dalam menghadapi data baru menjadi kurang optimal.



Gambar 4.3 Grafik Loss Training 1

Sebaliknya, pada **Gambar 4.4** grafik loss menunjukkan pola yang lebih stabil dan seimbang antara training loss dan validation loss. Kedua nilai loss mengalami penurunan secara bertahap dengan jarak yang relatif kecil, meskipun terdapat sedikit fluktuasi pada beberapa epoch. Tidak adanya lonjakan signifikan pada validation loss menandakan bahwa model memiliki kemampuan generalisasi yang lebih baik dibandingkan Training 1. Dengan selisih loss yang lebih kecil dan tren yang lebih konsisten, Training 2 dapat dinyatakan lebih efektif dalam meminimalkan kesalahan

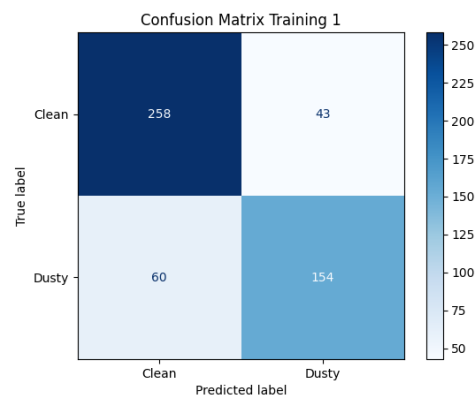
prediksi pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya, sehingga lebih layak digunakan untuk tahap pengujian dan implementasi lanjutan.



Gambar 4.4 Grafik Loss Training 2

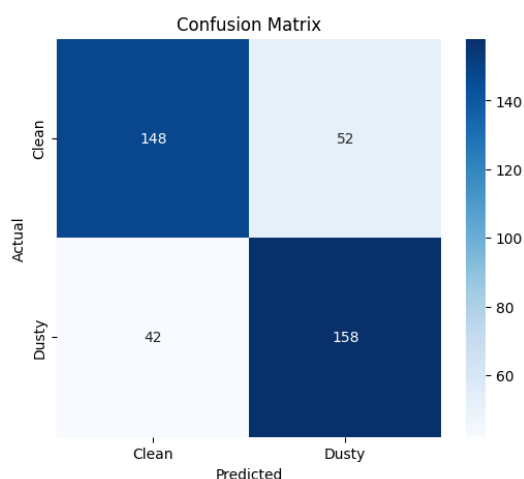
4.1.3 Confusion Matrix

Berdasarkan confusion matrix Training 1, model menunjukkan performa yang belum seimbang dalam mengklasifikasikan kedua kelas. Pada kelas Clean, sebanyak 258 data berhasil diprediksi dengan benar, namun masih terdapat 43 data yang salah diklasifikasikan sebagai Dusty. Sementara itu, pada kelas Dusty, model hanya mampu mengklasifikasikan 154 data dengan benar, dengan 60 data yang salah diprediksi sebagai Clean. Jumlah kesalahan yang relatif lebih besar pada kelas Dusty menunjukkan bahwa model pada Training 1 cenderung lebih bias terhadap kelas Clean, sehingga kemampuan generalisasi model dalam mendeteksi kondisi panel surya berdebu masih belum optimal.



Gambar 4.5 Confusion Matrix Training 1

Sebaliknya, pada confusion matrix Training 2, model menunjukkan peningkatan performa yang lebih baik dan seimbang. Pada kelas Clean, sebanyak 148 data berhasil diklasifikasikan dengan benar, dengan 52 data yang masih mengalami kesalahan klasifikasi. Untuk kelas Dusty, model mampu memprediksi 158 data dengan benar, sementara 42 data salah diklasifikasikan sebagai Clean. Dibandingkan Training 1, jumlah kesalahan pada kelas Dusty mengalami penurunan, yang mengindikasikan bahwa Training 2 memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengenali karakteristik debu pada permukaan panel surya. Dengan distribusi kesalahan yang lebih merata antar kelas, Training 2 dapat dinyatakan memiliki performa klasifikasi yang lebih baik dan lebih stabil untuk diterapkan pada pengujian selanjutnya.



Gambar 4.6 Confusion Matrix Training 2

4.2 Hasil dan Analisa Pergerakan Robot terhadap Kemiringan Panel

Pengujian pergerakan robot pada bidang miring dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan torsi motor DC dalam menggerakkan robot hingga mencapai setpoint meskipun beroperasi pada permukaan yang memiliki sudut kemiringan. Prosedur pengujian dilakukan dengan menempatkan robot di atas panel surya yang diatur pada variasi sudut kemiringan antara 0° hingga 10° . Data hasil pengujian kemiringan tersebut disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kemiringan Robot

Derajat Kemiringan	RPM	Hasil
0	31.42	Bersih
0	30.85	Bersih
0	31.10	Bersih
5	28.30	Bersih
5	27.95	Bersih
5	28.50	Bersih
10	23.15	Kotor
10	22.80	Kotor
10	24.50	Bersih

Berdasarkan **Tabel 4.1** hasil pengujian kemiringan robot, dari total 9 percobaan dengan rentang kemiringan antara 0° hingga 10°, robot berhasil menyelesaikan proses pembersihan pada 7 percobaan, sedangkan 2 percobaan menghasilkan kondisi yang masih kotor. Dengan demikian, tingkat keberhasilan pembersihan pada pengujian kemiringan adalah sebesar 77,78%, sementara tingkat kegagalannya sebesar 22,22%. Keberhasilan dalam pembersihan konsisten terjadi pada seluruh pengujian dengan kemiringan 0° dan 5°, menunjukkan bahwa motor DC memiliki torsi stabil di pergerakan rotasi 27.95 hingga 31.42 RPM yang memungkinkan performa 100% pada setpoint dengan status optimal "Bersih". Kondisi ini menjadi konfirmasi jika suplai torsi dari motor arus searah memenuhi kapabilitas dalam menggerakkan robot menstabilkan pembersihan tanpa dihalangi gaya gravitasi. yang cukup untuk mengoperasikan robot dengan baik pada sudut tersebut.

Namun, pada kemiringan 10°, dari 3 percobaan yang dilakukan, robot hanya berhasil membersihkan panel pada percobaan ke-3 (percobaan terakhir pada sudut tersebut), sedangkan pada dua percobaan pertama (ke-1 dan ke-2 di sudut 10°) hasilnya masih kotor. Secara keseluruhan, terjadi defisit RPM rata-rata sebesar 24%, menyentuh kisaran terendah 22.80 - 24.50 RPM dan diiringi dua dari tiga laporan hasil pengujian dengan kondisi "Kotor" (*error rate* 66.7%). Hal ini

mengindikasikan bahwa pada kemiringan 10° , beban gravitasi yang diterima oleh motor DC mulai berdampak pada kemampuannya untuk menggerakkan robot secara optimal, sehingga hasil pembersihannya kurang maksimal.

4.3 Hasil dan Analisa Pengujian Aktual MobileNetV2 pada Permukaan Panel Surya

Berikut merupakan hasil pengujian aktual MobileNetV2 pada permukaan panel surya dalam kondisi lingkungan nyata. Analisis dilakukan untuk menilai kemampuan model dengan mempertimbangkan kondisi asli panel terhadap pembacaan pada MobileNetV2, berikut merupakan hasil pengujian MobileNetV2 pada permukaan panel surya.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian pada Cahaya Lampu

Percobaan	Cahaya	Kondisi Asli	Hasil MobileNetV2	Baca Confidence Score (%)
1	Lampu	Bersih	Bersih	78,1
2	Lampu	Bersih	Bersih	91,26
3	Lampu	Kotor	Kotor	82,99
4	Lampu	Kotor	Kotor	88,11
5	Lampu	Kotor	Kotor	52,09
6	Lampu	Kotor	Bersih	60,42
7	Lampu	Kotor	Bersih	50,69

Berdasarkan Tabel 4.2 hasil pengujian pada cahaya lampu, dari total 7 percobaan, sistem MobileNetV2 berhasil mendeteksi kondisi panel surya dengan benar sebanyak 5 percobaan, sedangkan 2 percobaan mengalami kesalahan deteksi. Dengan demikian, tingkat keberhasilan deteksi pada kondisi cahaya lampu adalah sebesar 71,43%, sementara tingkat error sebesar 28,57%.

Keberhasilan deteksi terjadi pada seluruh pengujian panel bersih serta sebagian besar pengujian panel kotor. Namun, kegagalan deteksi terjadi pada percobaan ke-6 dan ke-7, di mana kondisi panel yang sebenarnya kotor terdeteksi sebagai bersih. Hal ini mengindikasikan bahwa pada pencahayaan lampu, variasi

intensitas dan arah cahaya dapat mempengaruhi tampilan visual panel sehingga menurunkan akurasi model dalam mengenali kondisi kotor.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian pada Cahaya Mendung

Percobaan	Cahaya	Kondisi Asli	Hasil MobileNetV2	Baca Confidence Score (%)
1	Mendung	Bersih	Bersih	71,89
2	Mendung	Bersih	Bersih	56,79
3	Mendung	Kotor	Kotor	81,77
4	Mendung	Kotor	Kotor	71,89
5	Mendung	Kotor	Kotor	83,86
6	Mendung	Kotor	Kotor	71,6

Berdasarkan Tabel 4.3 pengujian dengan kondisi cahaya mendung, seluruh 6 percobaan menunjukkan hasil deteksi yang sesuai dengan kondisi asli panel surya. Dengan demikian, tingkat keberhasilan deteksi mencapai 100%, dan tingkat error sebesar 0%.

Hasil ini menunjukkan bahwa pencahayaan mendung memberikan kondisi pencahayaan yang lebih merata dan minim pantulan cahaya, sehingga fitur visual panel dapat dikenali dengan lebih baik oleh MobileNetV2. Kondisi ini menjadi pencahayaan yang paling optimal dalam pengujian sistem deteksi kebersihan panel surya.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian pada Cahaya Cerah

Percobaan	Cahaya	Kondisi Asli	Hasil MobileNetV2	Baca Confidence Score (%)
1	Cerah	Bersih	Bersih	67,28
2	Cerah	Bersih	Bersih	67,07
3	Cerah	Bersih	Bersih	64,27
4	Cerah	Bersih	Bersih	52,1
5	Cerah	Kotor	Kotor	85,21
6	Cerah	Kotor	Kotor	78,4

Percobaan	Cahaya	Kondisi Asli	Hasil MobileNetV2	Baca Confidence Score (%)
7	Cerah	Kotor	Kotor	63
8	Cerah	Bersih	Kotor	60,32
9	Cerah	Bersih	Kotor	56,75
10	Cerah	Bersih	Kotor	66,26
11	Cerah	Bersih	Kotor	68,7

Berdasarkan Tabel 4.4 hasil pengujian pada cahaya cerah, dari total 11 percobaan, sistem berhasil mendeteksi kondisi panel surya dengan benar pada 7 percobaan, sedangkan 4 percobaan mengalami kesalahan deteksi. Dengan demikian, tingkat keberhasilan deteksi pada kondisi cahaya cerah adalah sebesar 63,64%, sedangkan tingkat error sebesar 36,36%.

Kesalahan deteksi seluruhnya terjadi pada kondisi panel yang sebenarnya bersih namun terdeteksi sebagai kotor. Hal ini diduga disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang tinggi yang menimbulkan pantulan dan bayangan pada permukaan panel, sehingga karakteristik visual panel bersih menjadi mirip dengan panel kotor. Tingginya tingkat error pada kondisi ini menunjukkan bahwa pencahayaan cerah merupakan tantangan tersendiri bagi sistem deteksi berbasis citra.

4.4 Hasil dan Analisa Integrasi MobileNetV2 terhadap Gerak Robot Pembersih

Berikut adalah hasil integrasi MobileNetV2 terhadap sistem gerak robot pembersih panel surya. Analisis difokuskan pada keterkaitan antara keluaran model dan respons pergerakan robot selama proses pembersihan berlangsung, berikut merupakan hasil integrasi MobileNetV2 terhadap gerak robot pembersih.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Integrasi MobileNetV2 terhadap Gerak Robot

<i>Trial</i>	<i>Initial Condition</i>	<i>Condition After Cleaning</i>	<i>Outcome</i>
<i>1</i>	<i>Dirty</i>	<i>Dirty</i>	<i>Unsuccessful</i>
<i>2</i>	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>

<i>Trial</i>	<i>Initial Condition</i>	<i>Condition After Cleaning</i>	<i>Outcome</i>
3	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
4	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
5	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
6	<i>Dirty</i>	<i>Dirty</i>	<i>Unsuccessful</i>
7	<i>Dirty</i>	<i>Dirty</i>	<i>Unsuccessful</i>
8	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
9	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
10	<i>Dirty</i>	<i>Dirty</i>	<i>Unsuccessful</i>
11	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
12	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
13	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
14	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
15	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
16	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
17	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
18	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
19	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>
20	<i>Dirty</i>	<i>Clean</i>	<i>Successful</i>

Hasil analisa menunjukkan bahwa sistem integrasi antara MobileNetV2 pada Raspberry Pi 4 dan sistem kendali gerak robot memiliki tingkat keberhasilan sebesar 80%. Pada 16 percobaan yang berhasil (Trial 2-5, 8-9, dan 11-20), robot mampu merespons deteksi "Dirty" dengan mengaktifkan aktuator pembersih berupa pompa air dan sikat berputar, serta melakukan pergerakan menyapu area panel hingga bersih. Keberhasilan ini membuktikan bahwa komunikasi data antara unit pemroses citra dan mikrokontroler berjalan dengan baik, dan logika program pembersihan berfungsi sesuai rancangan.

Namun, terdapat kegagalan pada 4 percobaan (Trial 1, 6, 7, dan 10), di mana kondisi panel tetap terdeteksi "Dirty" setelah proses pembersihan. Kegagalan ini dapat dianalisis sebagai akibat dari beberapa faktor mekanis dan lingkungan, antara

lain jenis kotoran yang kemungkinan bersifat lebih adhesif atau membandel sehingga tidak dapat terangkat sempurna dalam satu kali siklus lintasan robot, kontak antara sikat pembersih dan permukaan panel surya yang tidak merata pada titik-titik tertentu, serta distribusi penyemprotan air yang mungkin tidak menjangkau area kotoran secara maksimal. Meskipun terdapat tingkat kegagalan sebesar 20%, secara keseluruhan sistem dinilai layak karena mayoritas percobaan menunjukkan transisi kondisi dari *Dirty* ke *Clean* yang sukses, dan untuk meningkatkan performa hingga mendekati 100%, disarankan adanya penambahan fitur pengulangan siklus (*retry mechanism*) apabila setelah pembersihan tahap pertama panel masih terdeteksi kotor.

4.5 Hasil dan Analisa Komunikasi WiFi antara Raspberry Pi 4 dan Sistem Kendali Robot

Disini dilakukan analisa komunikasi WiFi antara Raspberry Pi 4 dan sistem kendali robot. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat latensi serta kestabilan pertukaran data selama sistem beroperasi. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan komunikasi nirkabel yang digunakan dalam proses pengendalian robot secara *real-time*. Adapun hasil pengujian latensi komunikasi WiFi dan komunikasi UART ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Latensi Wifi

Percobaan	Latensi Komunikasi (ms)
1	13
2	9
3	6
4	6
5	18
6	22

Berdasarkan Tabel 4.6, hasil pengujian latensi komunikasi WiFi antara Raspberry Pi 4 dan sistem kendali robot menunjukkan nilai latensi yang relatif rendah dengan rentang antara 6 ms hingga 22 ms. Latensi terendah terjadi pada percobaan ke-3 dan ke-4 sebesar 6 ms, sedangkan latensi tertinggi terjadi pada

percobaan ke-6 sebesar 22 ms. Percobaan lainnya menghasilkan latensi sebesar 13 ms, 9 ms, dan 18 ms, yang menunjukkan bahwa sebagian besar nilai latensi berada di bawah 20 ms. Variasi latensi ini dipengaruhi oleh kondisi jaringan nirkabel saat pengujian, seperti interferensi sinyal dan kestabilan koneksi. Secara keseluruhan, nilai latensi yang diperoleh masih tergolong baik dan memadai untuk mendukung komunikasi data secara *real-time* pada sistem kendali robot.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Latensi UART

Percobaan	Latensi Komunikasi (us)
1	30649
2	17352
3	43549
4	18247
5	34671
6	24536

Berdasarkan Tabel 4.7, hasil pengujian latensi komunikasi UART menunjukkan nilai latensi yang lebih besar dibandingkan WiFi, dengan rentang antara 17.352 μ s hingga 43.549 μ s. Latensi terendah diperoleh pada percobaan ke-2 sebesar 17.352 μ s, sedangkan latensi tertinggi terjadi pada percobaan ke-3 sebesar 43.549 μ s. Percobaan lainnya menunjukkan nilai latensi sebesar 30.649 μ s, 18.247 μ s, 34.671 μ s, dan 24.536 μ s, yang menandakan adanya variasi waktu komunikasi pada setiap pengujian. Perbedaan nilai latensi ini disebabkan oleh proses komunikasi serial yang berjalan secara berurutan serta beban pemrosesan data pada masing-masing perangkat. Meskipun memiliki latensi yang lebih tinggi, komunikasi UART masih dapat digunakan secara andal untuk pertukaran data internal dalam sistem.