

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

5.1 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian merupakan tahapan awal pada Bab V yang digunakan untuk menjelaskan cara pengambilan data setelah alat selesai dirakit dan diprogram. Pada tahap ini, pengujian tidak langsung dilakukan secara keseluruhan, tetapi diawali dengan memastikan setiap bagian utama sistem dapat bekerja sesuai fungsi yang telah dirancang. Bagian yang diperiksa meliputi catu daya, rangkaian kendali ESP32, pembacaan sensor, pengaturan PWM, tampilan LCD, pencatatan data ke Google Spreadsheet, serta bentuk sinyal gelombang pada osiloskop.

Pengujian dilakukan agar karakteristik alat dapat diketahui berdasarkan data hasil pengukuran. Apabila pada saat pengujian ditemukan pembacaan yang tidak sesuai, sambungan rangkaian dan program diperiksa kembali sebelum data akhir digunakan. Dengan cara ini, hasil pengujian yang disajikan pada bab ini tidak hanya menunjukkan bahwa alat menyala, tetapi juga memperlihatkan hubungan antara nilai PWM, intensitas cahaya, tegangan, arus, temperatur, dan kestabilan sinyal kendali.

Sistematika pengujian pada alat ini dibagi menjadi beberapa bagian. Pertama, dilakukan pengujian variasi PWM untuk melihat perubahan keluaran lampu dan temperatur. Kedua, dilakukan pengujian pencatatan data pada Google Spreadsheet untuk memastikan data sensor tersimpan secara otomatis. Ketiga, dilakukan pengujian sinyal PWM dan respon *switching* MOSFET menggunakan osiloskop dua kanal. Setiap pengujian dilengkapi dengan langkah-langkah, tabel hasil, dan uraian analisa.

5.1.1 Langkah-Langkah Umum Pengujian

Sebelum pengujian tiap bagian dilakukan, alat disiapkan terlebih dahulu agar kondisi pengambilan data lebih teratur. Langkah-langkah umum ini menjadi acuan awal untuk semua pengujian yang dilakukan pada alat.

Tabel 5- 1 Langkah-langkah umum pengujian

No.	Langkah Pengujian	Tujuan
1	Memeriksa kembali sambungan kabel pada catu daya, ESP32, sensor, MOSFET, LED, LCD, dan kipas.	Memastikan tidak ada jalur yang terbalik, lepas, atau berpotensi hubung singkat.
2	Menghubungkan alat ke sumber AC PLN melalui PSU 12 V 10 A.	Memberikan suplai utama pada rangkaian.
3	Mengaktifkan rangkaian kendali ESP32 dan memastikan LCD menampilkan data awal.	Mengetahui bahwa program sudah berjalan.
4	Memastikan koneksi Wi-Fi aktif dan Google Spreadsheet siap menerima data.	Menguji fungsi pencatatan data secara online.
5	Mengatur nilai PWM sesuai skenario pengujian.	Melihat perubahan kerja lampu pada setiap variasi pengaturan.
6	Mencatat data tegangan, arus, cahaya, dan temperatur.	Mendapatkan data untuk analisa performa alat.
7	Melakukan pengukuran sinyal menggunakan osiloskop dua kanal.	Mengetahui bentuk sinyal pada sisi LED dan pada gate MOSFET.

5.2 Pengujian Variasi PWM 0-255 terhadap Kerja Lampu

Pengujian variasi PWM dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai PWM digital terhadap kerja lampu COB LED 100 W. Pada pengujian ini, nilai PWM tidak ditampilkan dalam bentuk persentase, tetapi menggunakan nilai PWM 8-bit secara langsung pada rentang 1 sampai 255. Hal ini dilakukan agar data yang ditampilkan sesuai dengan nilai kendali yang diberikan oleh ESP32 ke rangkaian MOSFET.

Parameter yang diamati pada pengujian ini meliputi arus, tegangan, daya, intensitas cahaya, serta temperatur saat kipas dalam kondisi menyala dan mati. Pengukuran intensitas cahaya dilakukan menggunakan lux meter, sehingga hasil pembacaan cahaya ditampilkan dalam satuan lux. Data arus dan tegangan diperoleh dari sensor INA226 yang dipasang pada jalur positif keluaran boost converter menuju lampu COB LED 100 W.

Langkah-langkah pengujian variasi PWM:

1. Menyalakan alat dan memastikan LCD menampilkan nilai PWM serta data sensor.
2. Mengatur nilai PWM sesuai variasi pengujian, yaitu mulai dari PWM 1 sampai PWM 255.
3. Mencatat nilai arus, tegangan, daya, intensitas cahaya menggunakan lux meter, dan temperatur saat kipas dalam kondisi menyala.
4. Mengulang pengamatan temperatur saat kipas dalam kondisi mati.
5. Membandingkan perubahan intensitas cahaya, daya, dan temperatur pada setiap variasi nilai PWM.

Tabel 5- 2 Data hasil pengujian variasi PWM pada lampu COB LED 100 W

Nilai PWM	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Lux	Lux/Daya	Temperatur (°C)	
						Kipas Nyala	Kipas Mati
1	0,05	34	1,7	24,1	14,18	31,2	31,2
2	0,23	34	7,82	116	14,83	31,2	31,2
3	0,53	34	18,02	218	12,10	31,2	31,2
4	0,92	34	31,28	338	10,81	31,2	31,2
5	1,02	33,9	34,58	458	13,24	31,2	31,6
6	1,17	33,8	39,55	576	14,56	31,2	31,9
7	1,49	33,8	50,36	696	13,82	31,3	32,2
8	1,92	33,8	64,9	814	12,54	31,3	32,6
9	2,06	33,8	69,63	935	13,43	31,4	33
10	2,48	33,9	84,07	1.058	12,58	31,4	33,4
25	3,28	33,8	110,86	2.830	25,53	32,8	37,7
40	3,28	33,7	110,54	4.640	41,98	41,3	45,2
55	3,28	33,5	109,88	6.450	58,70	41,3	45,2
70	3,28	33,5	109,88	8.360	76,08	42,1	49,8
85	3,28	32,8	107,58	10.270	95,46	42,9	53,4
100	3,28	32,1	105,29	11.820	112,26	42,9	53,4
115	3,28	32,1	105,29	13.380	127,08	43,1	55,7

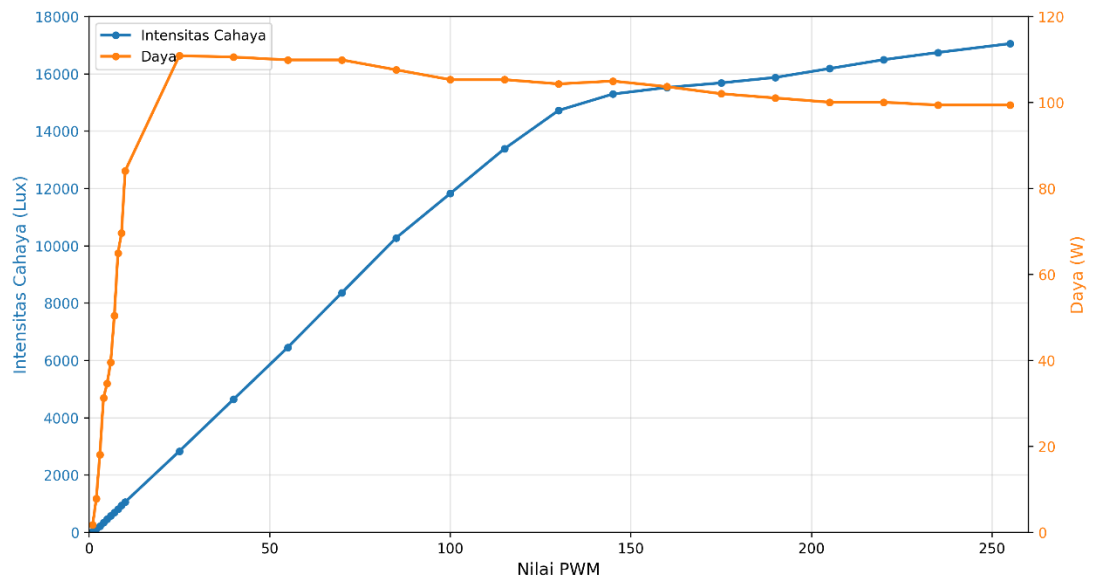
130	3,28	31,8	104,3	14.720	141,13	43,6	57,1
145	3,28	32	104,96	15.290	145,67	43,4	57,5
160	3,28	31,6	103,65	15.520	149,73	43,8	57,2
175	3,28	31,1	102,01	15.680	153,71	43,3	58,2
190	3,28	30,8	101,02	15.870	157,10	43,9	60
205	3,28	30,5	100,04	16.180	161,74	44,6	62,4
220	3,28	30,5	100,04	16.490	164,83	44,9	65,4
235	3,28	30,3	99,38	16.740	168,44	45,5	72,1
255	3,28	30,3	99,38	17.050	171,56	45,5	77,4

Keterangan: Nilai intensitas cahaya pada kolom lux diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan lux meter. Sensor LDR yang terpasang pada alat tidak membaca intensitas cahaya dalam satuan lux secara langsung, tetapi membaca nilai ADC dari ESP32 dengan rentang 0 sampai 4095. Oleh karena itu, data ADC LDR hanya digunakan sebagai indikator perubahan cahaya, sedangkan nilai lux yang digunakan dalam analisis berasal dari hasil pengukuran lux meter. Untuk memperjelas hubungan pembacaan LDR dan lux meter, dilakukan perbandingan pada beberapa nilai PWM rendah. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa saat nilai ADC LDR meningkat, nilai lux yang terbaca pada *lux meter* juga cenderung meningkat

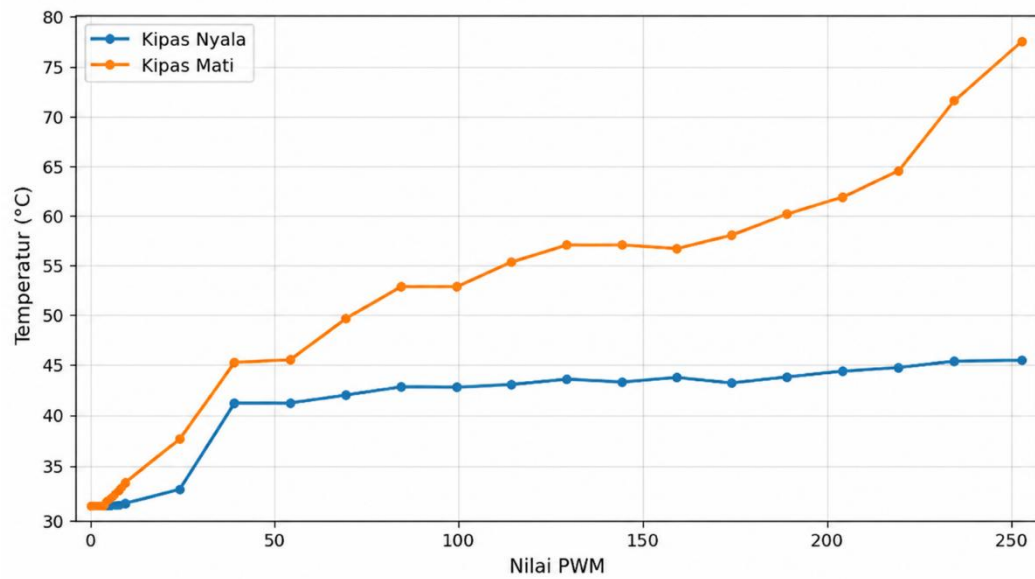
Tabel 5- 3 Perbandingan Nilai ADC LDR dan Intensitas Cahaya Lux Meter

Nilai PWM	ADC LDR	Lux Meter
1	496	24,1
2	1328	116
3	1825	218
4	2129	338
5	2320	458

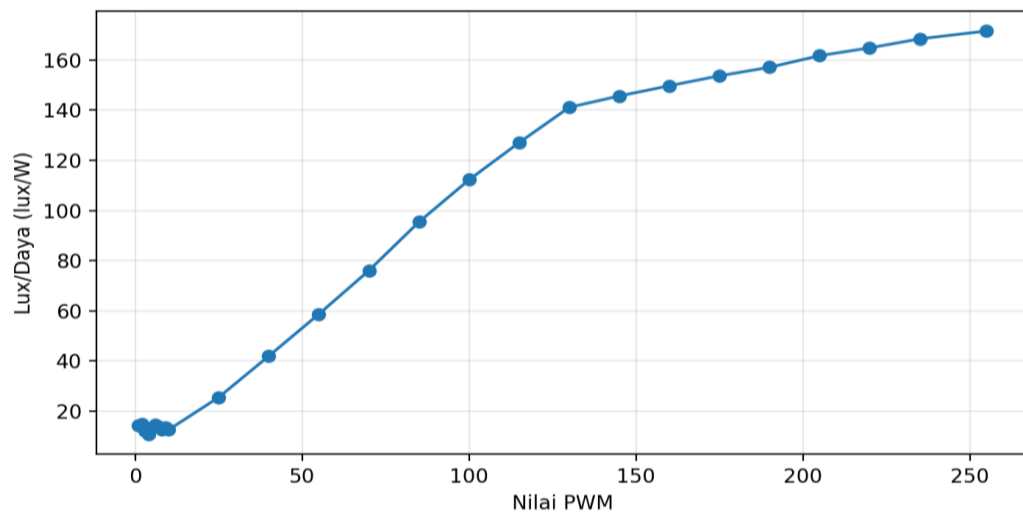
Dari data tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar nilai ADC LDR, maka nilai lux yang terbaca pada lux meter juga meningkat. Dengan demikian, LDR dapat digunakan sebagai indikator perubahan intensitas cahaya, tetapi hasil yang lebih akurat tetap diperoleh dari *lux meter*. Nilai daya pada tabel dihitung dari hasil perkalian tegangan dan arus berdasarkan persamaan $P = V \times I$.



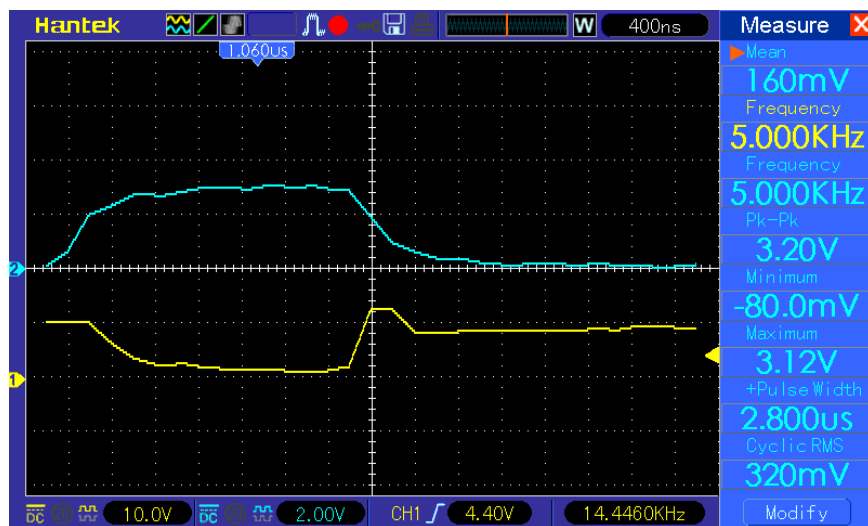
Gambar 5- 2 Grafik hubungan nilai PWM terhadap intensitas cahaya dan daya



Gambar 5- 3 Grafik perbandingan temperatur saat kipas nyala dan mati



Gambar 5- 4 Grafik hubungan nilai PWM terhadap LUX/Daya



Gambar 5- 5 Hasil gelombang osiloskop pada PWM rendah 3



Gambar 5- 6 Perbandingan PWM 255 dan 1

5.2.1 Analisa Pengujian Variasi PWM

Berdasarkan data hasil pengujian, pada beberapa nilai PWM awal arus yang terbaca sudah cukup besar, sedangkan intensitas cahaya masih meningkat secara bertahap. Sebagai contoh, pada PWM 10 arus telah mencapai 2,48 A dengan daya sebesar 84,07 W, tetapi intensitas cahaya yang terukur masih sebesar 1.058 lux. Selanjutnya, pada PWM 25 arus meningkat menjadi 3,28 A dengan daya sebesar 110,86 W, sedangkan intensitas cahaya bertambah menjadi 2.830 lux. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan arus dan intensitas cahaya tidak selalu membentuk pola kenaikan yang sama pada setiap nilai PWM.

Kondisi tersebut terjadi karena metode PWM tidak secara langsung menurunkan atau menaikkan tegangan keluaran boost converter. PWM bekerja dengan mengatur lama waktu MOSFET berada dalam kondisi ON dan OFF pada setiap periode. Ketika MOSFET berada dalam kondisi ON, lampu menerima suplai dari boost converter dengan arus yang relatif besar. Namun, pada nilai PWM rendah, waktu ON masih berlangsung singkat sehingga energi rata-rata yang diterima lampu selama satu periode belum maksimal. Akibatnya, meskipun pembacaan arus sesaat atau hasil pembacaan INA226 sudah menunjukkan nilai yang cukup besar, intensitas cahaya yang dihasilkan masih lebih rendah dibandingkan pada nilai PWM yang lebih tinggi.

Semakin besar nilai PWM, durasi MOSFET berada dalam kondisi ON menjadi semakin panjang. Kondisi ini menyebabkan energi rata-rata yang disalurkan ke lampu meningkat, sehingga intensitas cahaya yang diukur menggunakan lux meter juga bertambah. Dengan demikian, nilai arus yang besar pada PWM rendah belum tentu langsung menghasilkan cahaya maksimum karena lampu hanya menerima arus tersebut dalam waktu aktif yang relatif singkat. Sebaliknya, pada PWM yang lebih tinggi, waktu penghantaran arus menjadi lebih lama sehingga keluaran cahaya meningkat meskipun nilai arus yang terbaca tidak selalu mengalami kenaikan yang besar.

Perbedaan pola antara arus dan intensitas cahaya juga dapat dipengaruhi oleh karakteristik pembacaan INA226 dan lux meter. INA226 membaca kondisi kelistrikan pada jalur lampu, sedangkan lux meter mengukur cahaya yang diterima

pada posisi pengukuran tertentu. Oleh karena itu, nilai lux tidak hanya dipengaruhi oleh arus, tetapi juga oleh duty cycle, karakteristik COB LED, jarak dan posisi lux meter, kondisi cahaya sekitar, serta kestabilan keluaran boost converter. Hal ini menyebabkan perubahan nilai PWM dapat menghasilkan peningkatan cahaya yang tidak selalu sebanding secara langsung dengan peningkatan arus.

Tegangan yang terbaca pada tabel masih berada pada kisaran tinggi karena merupakan tegangan bus keluaran boost converter yang disalurkan menuju lampu. Pada PWM rendah, beban efektif lampu masih relatif kecil karena waktu ON MOSFET masih singkat. Oleh sebab itu, tegangan keluaran boost converter dapat bertahan pada kisaran 34 V. Ketika nilai PWM dinaikkan, MOSFET berada dalam kondisi ON lebih lama sehingga lampu memberikan beban yang lebih besar terhadap rangkaian catu daya. Kondisi tersebut menyebabkan tegangan secara bertahap menurun hingga sekitar 30,3 V pada PWM 235 sampai PWM 255.

Penurunan tegangan pada PWM tinggi menunjukkan adanya voltage drop ketika sistem bekerja dengan beban yang lebih besar. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh rugi-rugi pada power supply, boost converter, kabel, sambungan, sensor INA226, MOSFET, dan komponen pendukung lainnya. Semakin besar arus yang mengalir, semakin besar pula kemungkinan terjadinya rugi tegangan pada setiap bagian rangkaian. Selain itu, kemampuan boost converter dalam mempertahankan tegangan keluaran juga dapat menurun ketika lampu bekerja mendekati daya maksimum.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM menyebabkan waktu aktif MOSFET semakin panjang dan energi rata-rata yang diterima lampu semakin besar. Hal tersebut membuat intensitas cahaya meningkat secara bertahap, sedangkan tegangan keluaran cenderung menurun akibat bertambahnya beban. Arus yang terbaca lebih cepat mencapai nilai tinggi, tetapi keluaran cahaya tetap mengikuti perubahan duty cycle. Dengan demikian, pengaturan kecerahan lampu pada sistem ini tidak hanya dipengaruhi oleh besar arus dan tegangan, tetapi terutama oleh lama waktu penghantaran MOSFET dalam setiap periode PWM.

5.3 Pengujian Temperatur Komponen pada Kondisi PWM Tinggi

Pengukuran suhu komponen dilakukan untuk mengetahui perubahan temperatur pada beberapa bagian utama alat ketika lampu COB LED 100 W bekerja pada nilai PWM tinggi, yaitu PWM 255. Pengujian dilakukan menggunakan thermal gun dengan cara mengarahkan sensor ke titik komponen yang sama pada setiap waktu pengamatan. Data suhu diambil pada kondisi awal, kemudian dilanjutkan pada menit ke-5, ke-10, ke-15, ke-20, ke-25, dan ke-30.

Komponen yang diamati meliputi ESP32, MOSFET, power supply, boost converter, kaca pelindung lampu, serta heatsink. Pengukuran suhu heatsink dilakukan pada kondisi kipas mati agar kenaikan suhu pada bagian pelepasan panas lampu dapat terlihat lebih jelas saat lampu dioperasikan terus-menerus pada PWM tinggi.



Gambar 5- 7 Proses pengukuran suhu komponen menggunakan thermal gun

Langkah-langkah pengukuran suhu adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan thermal gun dan memastikan alat ukur dalam kondisi baik agar pembacaan suhu stabil. Setelah itu, rangkaian floodlight diperiksa, meliputi power supply, boost converter, ESP32, MOSFET, lampu COB LED, serta ground rangkaian.
2. Menempatkan alat pada posisi tetap dan tidak terkena sumber panas lain secara langsung. Nilai PWM kemudian diatur pada kondisi tinggi, yaitu PWM 255,

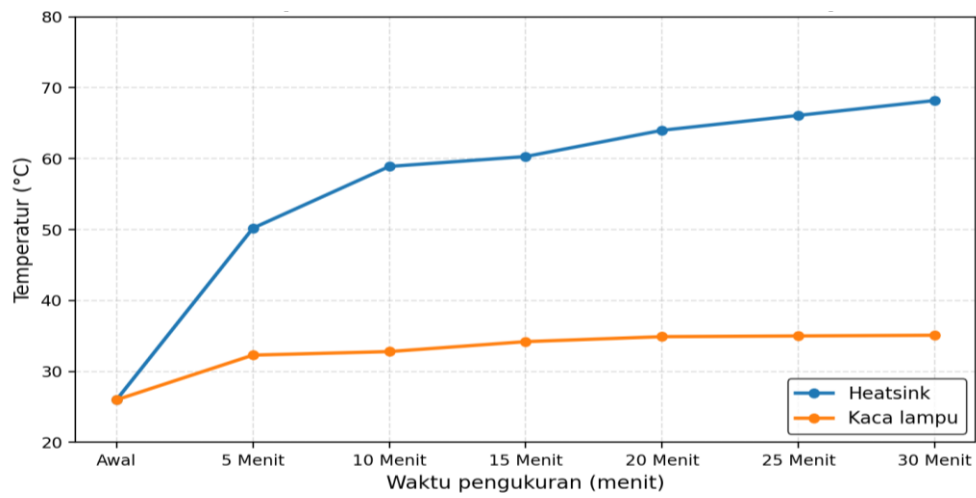
karena pengujian bertujuan melihat perubahan temperatur komponen saat lampu bekerja pada beban besar.

3. Menentukan titik pengukuran suhu pada ESP32, MOSFET, power supply, boost converter, kaca pelindung lampu, dan heatsink. Suhu awal dicatat sebesar 26 °C sebagai suhu ruang saat alat baru dinyalakan, kemudian pengukuran dilanjutkan pada menit ke-5, ke-10, ke-15, ke-20, ke-25, dan ke-30.

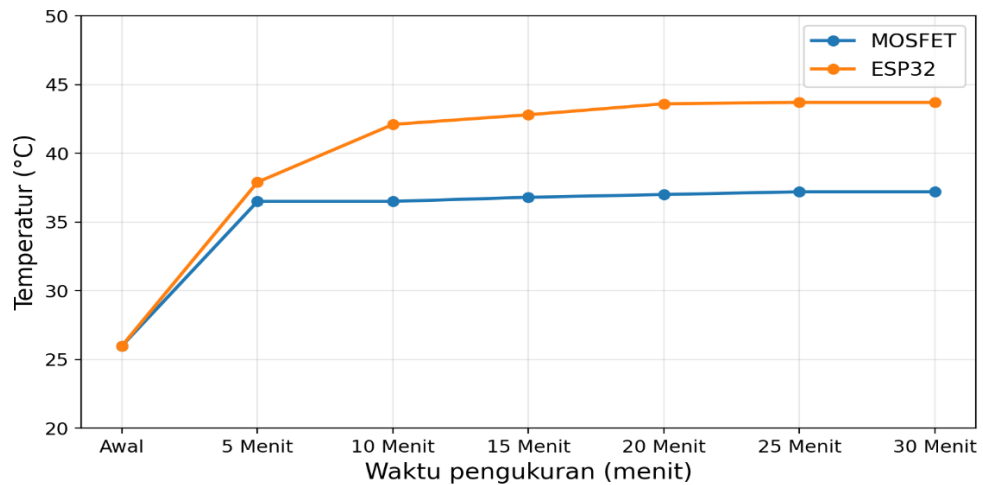
Tabel 5- 4 Data Hasil Pengukuran Suhu Komponen Menggunakan Thermal Gun

Komponen	Suhu Awal (°C)	5 Menit (°C)	10 Menit (°C)	15 Menit (°C)	20 Menit (°C)	25 Menit (°C)	30 Menit (°C)
ESP32	26	37,9	42,1	42,8	43,6	43,7	43,7
MOSFET	26	36,5	36,5	36,8	37	37,2	37,2
Power supply	26	61,3	62	61,5	62,3	62,6	62,9
Boost converter	26	64,2	67,8	68	68,1	68,2	68,7
Kaca lampu	26	32,3	32,8	34,2	34,9	35	35,1
Heatsink	26	50,2	58,9	60,3	64	66,1	68,2

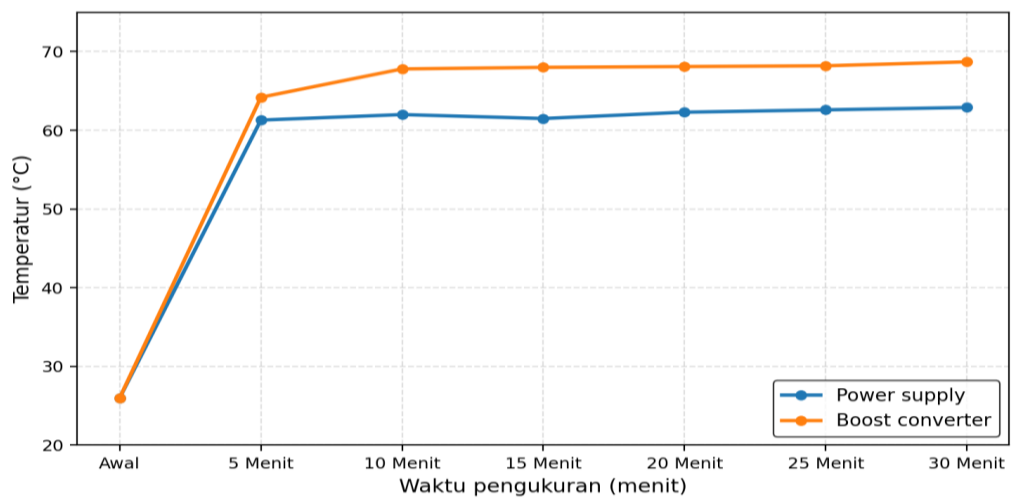
Keterangan: Suhu awal disamakan pada 26°C karena pengukuran awal dilakukan saat komponen baru dinyalakan dan masih mengikuti suhu ruang. Data pada menit ke-5 sampai menit ke-30 merupakan hasil pembacaan thermal gun pada titik komponen yang sama. Pengukuran heatsink dilakukan saat kipas mati, sedangkan jarak dan sudut thermal gun dibuat relatif tetap agar hasil pembacaan lebih konsisten.



Gambar 5- 8 Grafik perubahan suhu heatsink dan kaca lampu



Gambar 5- 9 Grafik perubahan suhu MOSFET dan ESP32



Gambar 5- 10 Grafik perubahan suhu power supply dan boost converter

5.3.1 Analisa Pengujian Temperatur Komponen

Kenaikan suhu terbesar terjadi pada heatsink, boost converter, dan power supply. Suhu boost converter meningkat dengan cepat hingga mencapai 64,2 °C pada menit ke-5 dan selanjutnya berada pada kisaran 67,8–68,7 °C. Sementara itu, suhu power supply berada pada kisaran 61,3–62,9 °C selama pengujian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bagian catu daya menerima beban kerja yang cukup besar ketika lampu dioperasikan pada PWM maksimum.

Heatsink mengalami peningkatan suhu secara terus-menerus, yaitu dari 26 °C pada kondisi awal menjadi 50,2 °C pada menit ke-5, 58,9 °C pada menit ke-10, 60,3 °C pada menit ke-15, 64 °C pada menit ke-20, 66,1 °C pada menit ke-25, dan 68,2 °C pada menit ke-30. Kenaikan tersebut menunjukkan adanya akumulasi panas dari lampu COB LED ketika kipas dalam kondisi mati. Oleh karena itu, penggunaan kipas pada heatsink diperlukan untuk membantu mempercepat pelepasan panas dan menjaga suhu lampu agar lebih stabil selama pengoperasian.

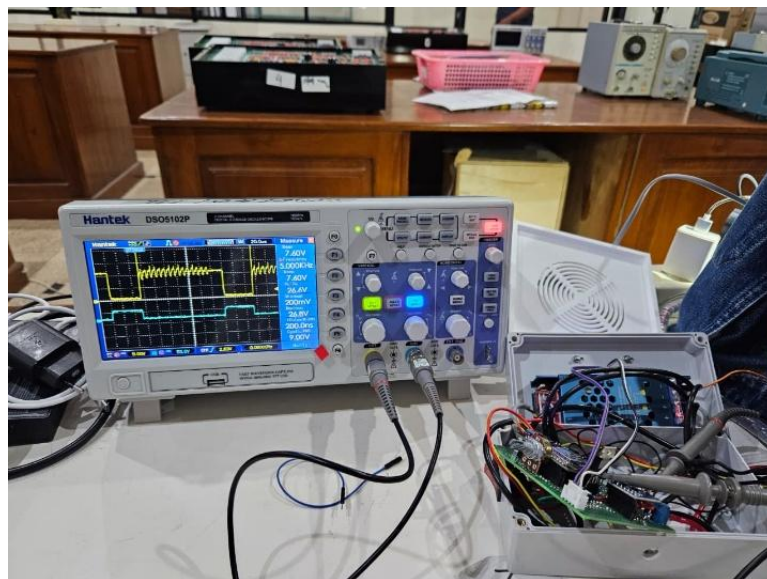
Suhu ESP32 meningkat dari 26 °C menjadi 37,9 °C pada menit ke-5 dan kemudian bertambah hingga mencapai 43,7 °C pada menit ke-25 dan ke-30. Berbeda dengan ESP32, suhu MOSFET mengalami kenaikan yang lebih rendah. Suhu MOSFET meningkat menjadi 36,5 °C pada menit ke-5 dan ke-10, kemudian naik secara perlahan hingga mencapai 37,2 °C pada menit ke-25 dan ke-30. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu MOSFET cenderung stabil pada kisaran 36,5–37,2 °C setelah sistem bekerja selama beberapa menit. Dengan demikian, beban termal pada MOSFET relatif lebih rendah dibandingkan ESP32, power supply, boost converter, dan heatsink.

Suhu kaca lampu mengalami peningkatan paling kecil, yaitu dari 26 °C menjadi 32,3 °C pada menit ke-5 dan mencapai 35,1 °C pada menit ke-30. Hal ini terjadi karena kaca lampu bukan bagian utama yang menerima dan melepaskan panas dari COB LED. Secara keseluruhan, komponen dengan suhu tertinggi adalah boost converter dan heatsink, sedangkan suhu MOSFET tetap relatif stabil selama pengujian. Oleh karena itu, perhatian utama pada sistem pendinginan perlu diarahkan pada heatsink, boost converter, dan power supply agar alat dapat bekerja lebih aman dan stabil ketika digunakan pada PWM tinggi dalam waktu yang lama.

5.4 Pengujian Frekuensi PWM Menggunakan Osiloskop

Pengujian osiloskop dilakukan untuk melihat hubungan antara sinyal PWM yang masuk ke gate MOSFET dan respon pada jalur lampu COB LED 100 W. Pada pengujian ini, garis biru atau cyan menunjukkan sinyal pada gate MOSFET sebagai sinyal kendali PWM, sedangkan garis kuning menunjukkan respon tegangan pada jalur negatif lampu COB LED terhadap ground.

Karena rangkaian menggunakan konfigurasi low-side switching, saat sinyal gate MOSFET berada pada kondisi tinggi, MOSFET menghantarkan arus dan jalur negatif lampu tertarik mendekati ground. Sebaliknya, saat gate berada pada kondisi rendah, MOSFET tidak menghantarkan arus sehingga jalur lampu tidak berada pada kondisi aktif. Oleh sebab itu, bentuk sinyal pada jalur lampu dapat tampak berlawanan atau mengalami perubahan terhadap sinyal gate, terutama pada bagian transisi ON dan OFF.



Gambar 5- 11 Proses pengambilan data menggunakan osiloskop

Pengujian dilakukan pada tiga variasi PWM, yaitu 30%, 50%, dan 70%. Pada pengujian osiloskop, variasi PWM dinyatakan dalam bentuk duty cycle, yaitu 30%, 50%, dan 70%. Nilai tersebut diperoleh dari perbandingan antara nilai PWM digital yang diberikan dengan nilai PWM maksimum yang digunakan pada program. Pada pengujian ini, nilai PWM maksimum yang digunakan adalah 225, sehingga persentase PWM dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Nilai PWM} = \text{Duty Cycle} \times \text{PWM}_{\text{maks}}$$

Berdasarkan persamaan tersebut,

nilai PWM 30% setara dengan:

$$\text{Nilai PWM} = 30\% \times 225$$

$$\text{Nilai PWM} = 0,30 \times 225 = 67,5 \approx 68$$

Nilai PWM 50% setara dengan:

$$\text{Nilai PWM} = 50\% \times 225$$

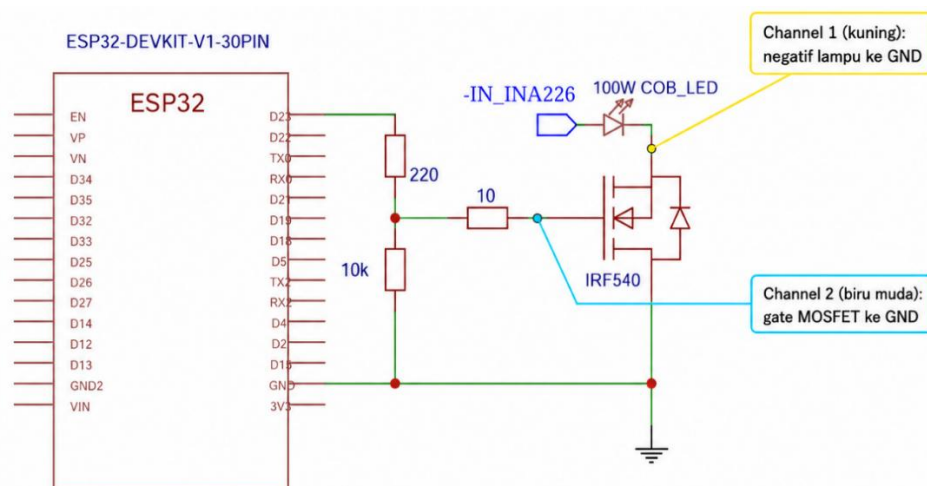
$$\text{Nilai PWM} = 0,50 \times 225 = 112,5 \approx 113$$

Nilai PWM 70% setara dengan:

$$\text{Nilai PWM} = 70\% \times 225$$

$$\text{Nilai PWM} = 0,70 \times 225 = 157,5 \approx 158$$

Dengan demikian, nilai PWM 68, 113, dan 158 digunakan untuk mewakili kondisi duty cycle 30%, 50%, dan 70%. Perbedaan duty cycle tersebut digunakan untuk melihat perubahan lebar pulsa PWM pada gate MOSFET serta respons tegangan pada jalur lampu. Semakin besar nilai PWM, semakin lama MOSFET berada pada kondisi ON dalam satu periode sinyal, sehingga bagian pulsa aktif pada osiloskop akan terlihat semakin lebar.



Gambar 5- 12 Titik pengukuran Osiloskop

Langkah-langkah pengujian osiloskop dilakukan sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dalam kondisi menyala, kemudian mengatur nilai PWM pada program sesuai variasi pengujian, yaitu 30%, 50%, dan 70%. Frekuensi PWM

diubah bertahap mulai dari 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, sampai 300 kHz.

2. Menghubungkan *channel* 1 osiloskop pada jalur negatif LED terhadap *ground*, kemudian menghubungkan *channel* 2 pada kaki *gate* MOSFET terhadap *ground*. Pengaturan *volt/div* dan *time/div* disesuaikan sampai bentuk gelombang pada layar osiloskop terlihat jelas.
3. Mencatat hasil pengukuran pada setiap kombinasi PWM dan frekuensi, meliputi frekuensi terbaca, V_{max} , V_{min} , dan V_{pp} . Setelah itu, tampilan gelombang osiloskop didokumentasikan sebagai satu gambar yang memuat CH1 dan CH2 secara bersamaan.

5.4.1 Hasil Pengujian Osiloskop pada PWM 30%

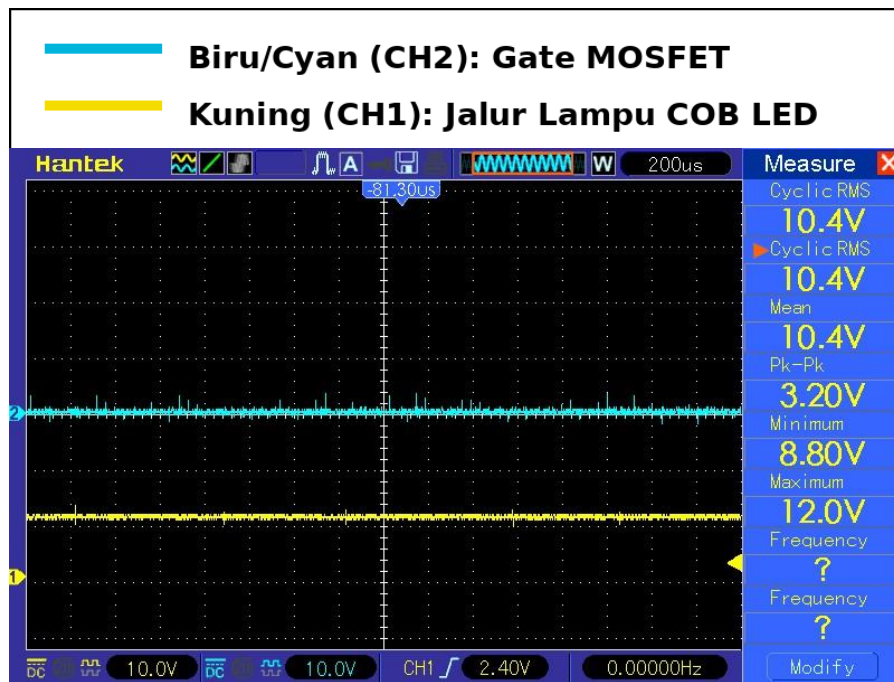
Pengujian pada PWM 30% dilakukan untuk melihat bentuk sinyal ketika waktu aktif MOSFET lebih pendek dibandingkan waktu tidak aktifnya. Pada kondisi ini, lebar pulsa tinggi pada sinyal PWM lebih kecil dalam satu periode gelombang.

Tabel ringkasan berikut tidak memuat gambar, tetapi berisi pengamatan utama berdasarkan dokumentasi foto osiloskop pada setiap frekuensi.

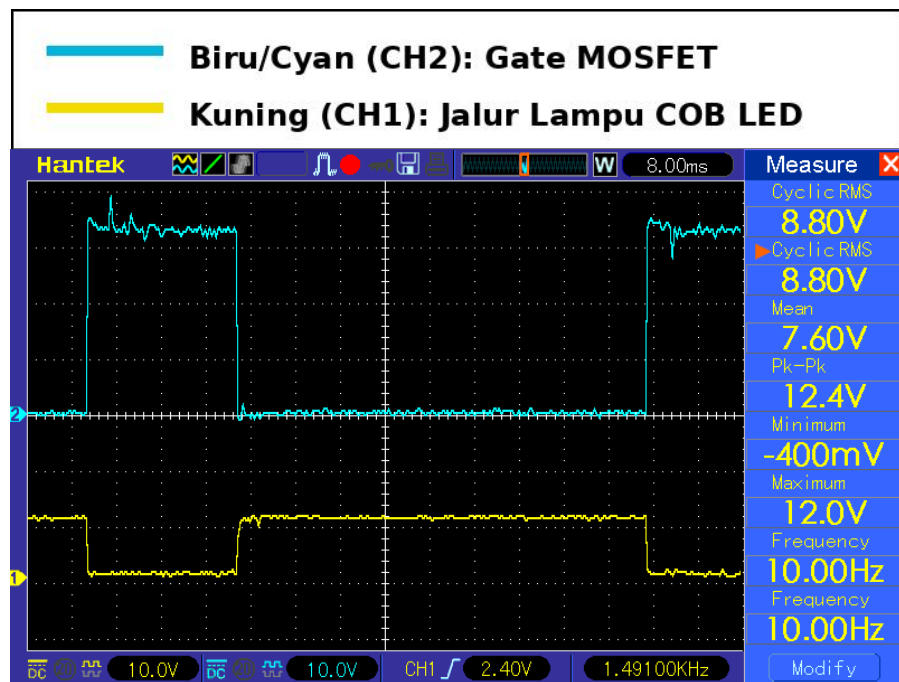
Tabel 5- 5 Ringkasan Pengamatan Osiloskop pada PWM 30%

No.	Frekuensi	Ringkasan Pengamatan Berdasarkan Foto
1	1 Hz	Kedua kanal tampak mendatar karena jendela waktu terlalu pendek untuk menangkap transisi PWM 1 Hz.
2	10 Hz	Pulsa 10 Hz terlihat jelas; waktu aktif gate lebih pendek dan jalur lampu berubah berlawanan.
3	100 Hz	Pulsa 100 Hz teratur; waktu aktif gate lebih pendek dan terdapat noise kecil saat transisi.
4	1 kHz	Pulsa 1 kHz masih kotak; waktu aktif gate lebih pendek dan jalur lampu mengikuti secara terbalik.
5	5 kHz	Pulsa 5 kHz masih jelas; tepi gate mulai melandai dan lonjakan tampak pada jalur lampu.
6	10 kHz	Pulsa 10 kHz tetap terbaca; tepi gate melandai serta ripple muncul pada jalur lampu.

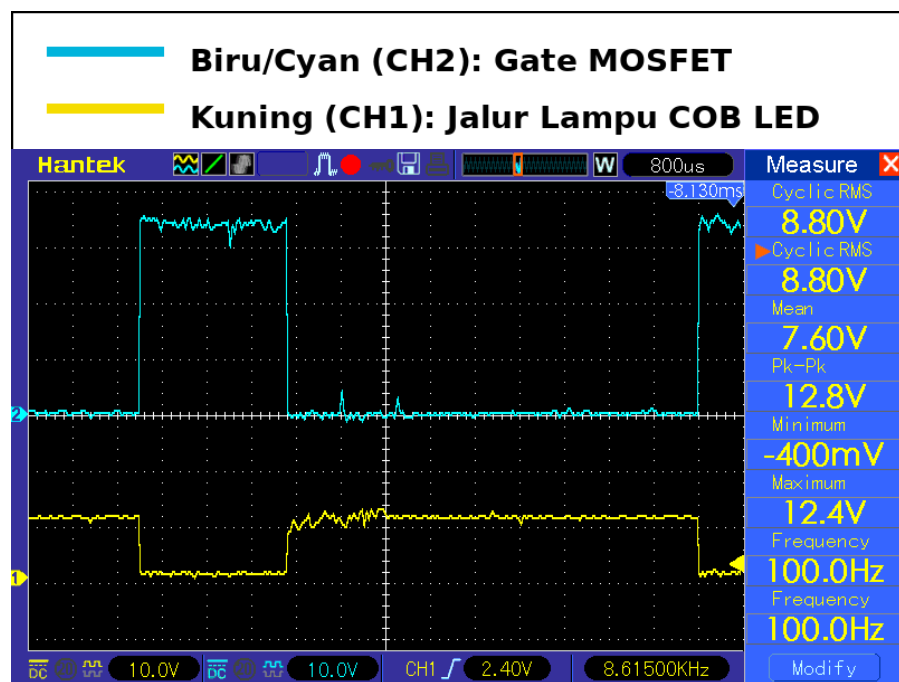
7	50 kHz	Pada 50 kHz, gate mulai membulat dan jalur lampu menunjukkan spike saat transisi.
8	100 kHz	Pada 100 kHz, gate semakin membulat serta spike dan osilasi tampak pada jalur lampu.
9	200 kHz	Pada 200 kHz, bagian datar gate berkurang dan jalur lampu menunjukkan spike yang lebih kuat.
10	300 kHz	Pada sekitar 301 kHz, gate tidak lagi kotak dan jalur lampu didominasi lonjakan transisi.



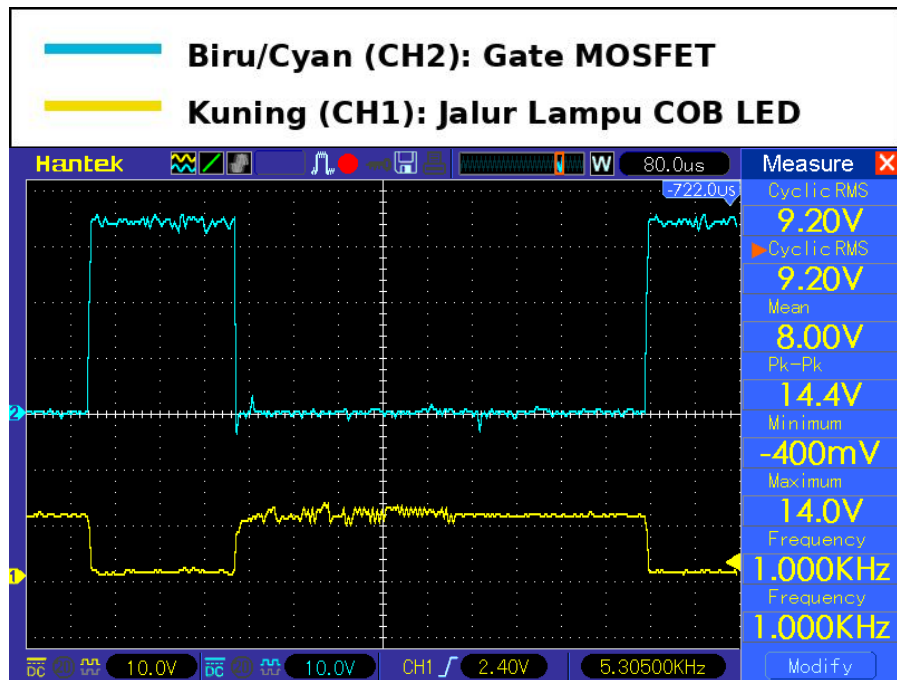
Gambar 5- 13 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 1 Hz



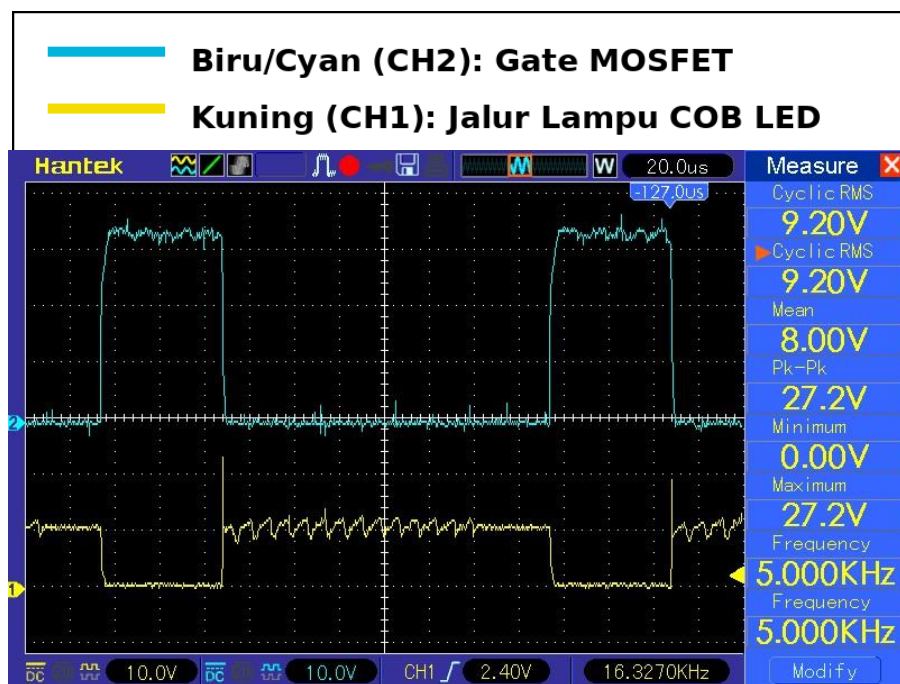
Gambar 5- 14 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 10 Hz



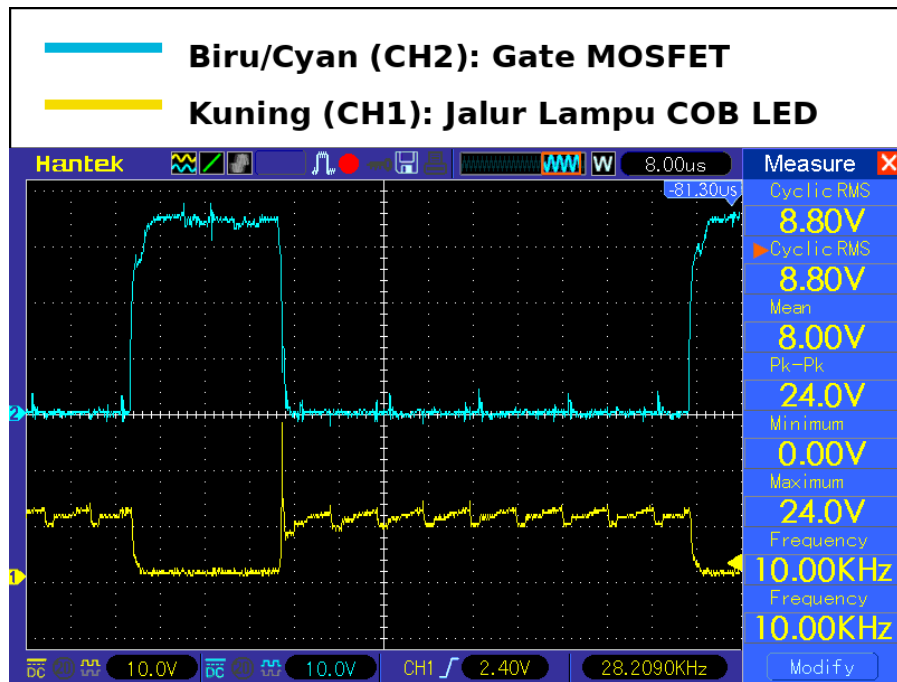
Gambar 5- 15 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 100 Hz



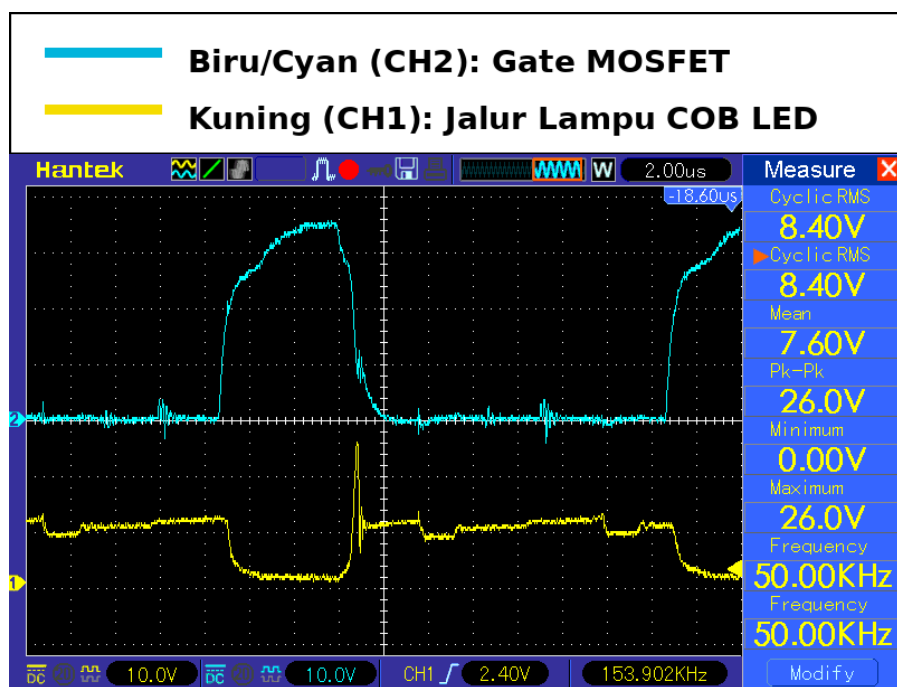
Gambar 5- 16 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 1 kHz



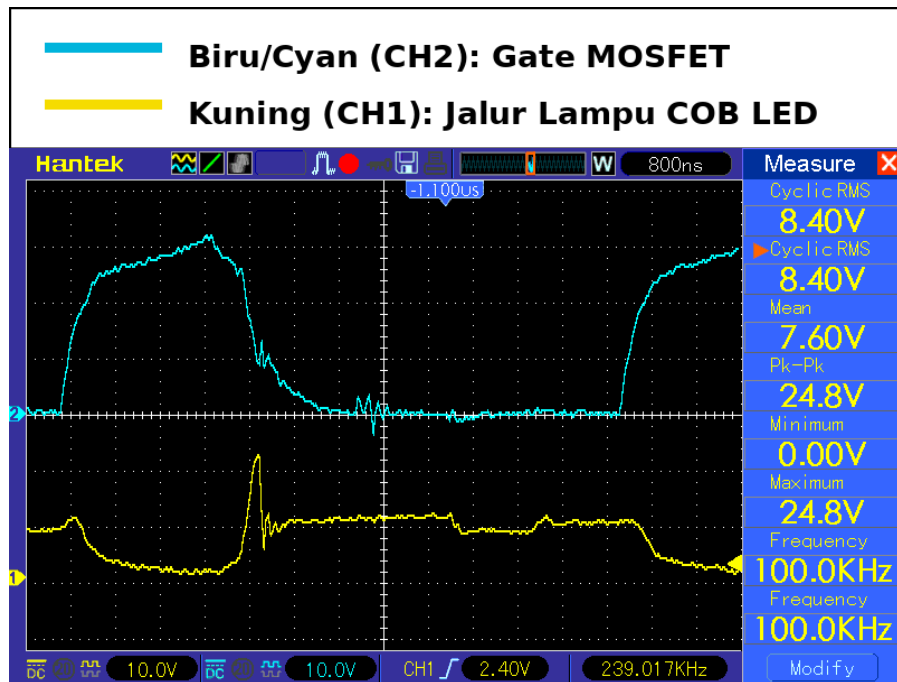
Gambar 5- 17 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 5 kHz



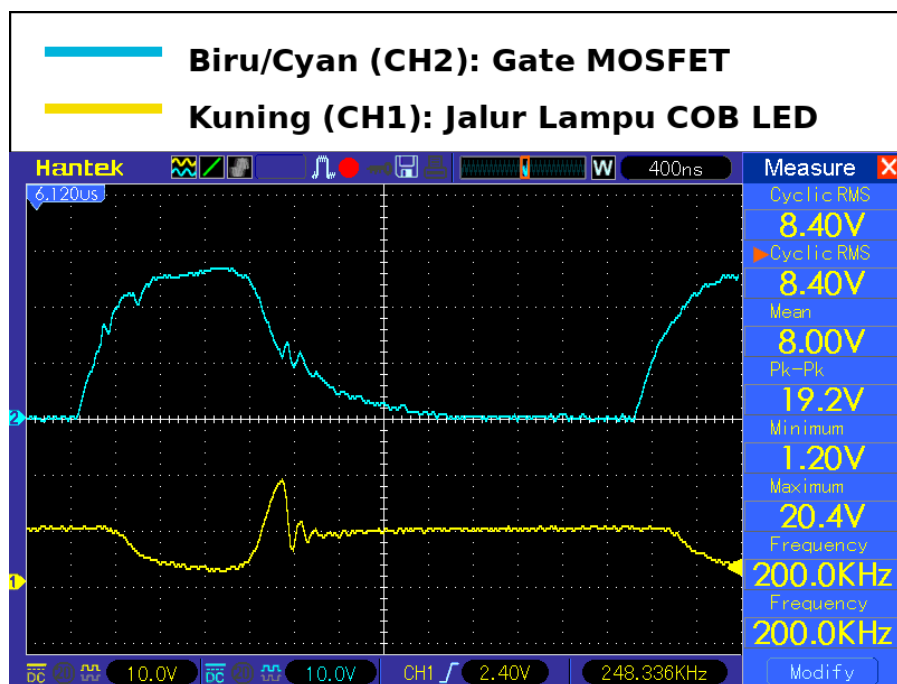
Gambar 5- 18 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 10 kHz



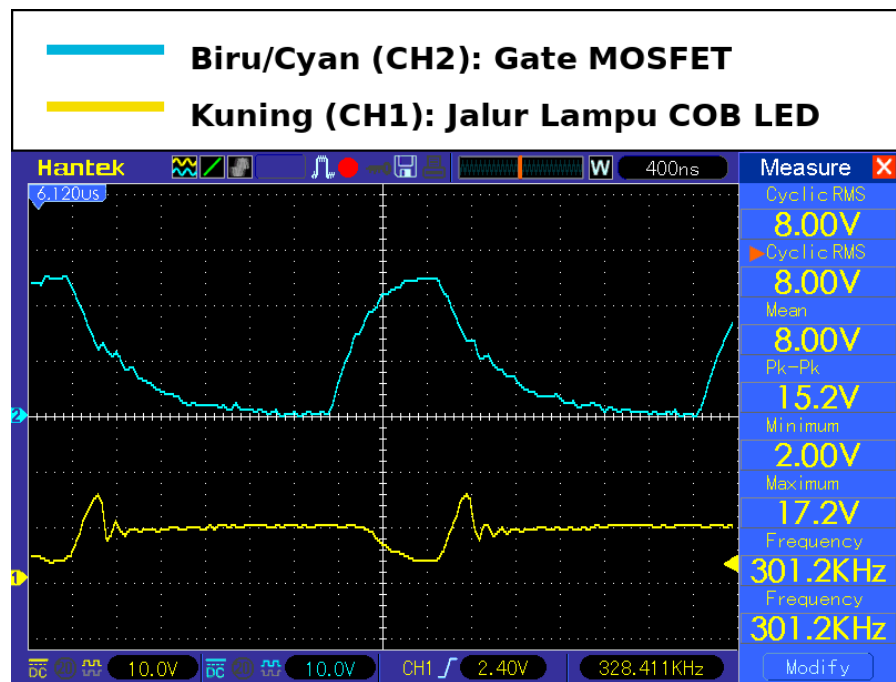
Gambar 5- 19 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 50 kHz



Gambar 5- 20 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 100 kHz



Gambar 5- 21 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 200 kHz



Gambar 5- 22 Hasil osiloskop PWM 30% pada frekuensi 300 kHz

Pada PWM 30%, sinyal gate MOSFET memiliki waktu aktif yang lebih pendek dibandingkan waktu tidak aktifnya. Berdasarkan hasil pengujian pada frekuensi 1 Hz, bentuk sinyal yang terbaca pada osiloskop cenderung berupa garis lurus, baik saat pengukuran dilakukan pada gate MOSFET maupun langsung pada keluaran PWM ESP32. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengaturan 1 Hz, sinyal PWM tidak terbaca sebagai pulsa switching yang jelas pada sistem. Akibatnya, MOSFET tidak menerima sinyal ON dan OFF secara normal, sehingga lampu tidak menyala secara stabil atau tidak menunjukkan respons switching yang sesuai. Dengan demikian, frekuensi 1 Hz tidak efektif digunakan pada sistem ini.

Pada frekuensi 10 Hz, bentuk pulsa sudah mulai terlihat, tetapi frekuensinya masih rendah sehingga lampu tampak berkedip cepat dan belum nyaman digunakan. Mulai frekuensi 100 Hz hingga beberapa kHz, pulsa terlihat lebih teratur dan respons jalur lampu mulai mengikuti perubahan sinyal gate dengan lebih jelas. Pada rentang ini, proses switching berlangsung lebih cepat sehingga kedipan tidak terlalu terlihat secara visual.

Pada frekuensi 50 kHz sampai 300 kHz, periode sinyal menjadi sangat pendek. Pada 50 kHz hingga 300 kHz bentuknya semakin membulat dan bagian

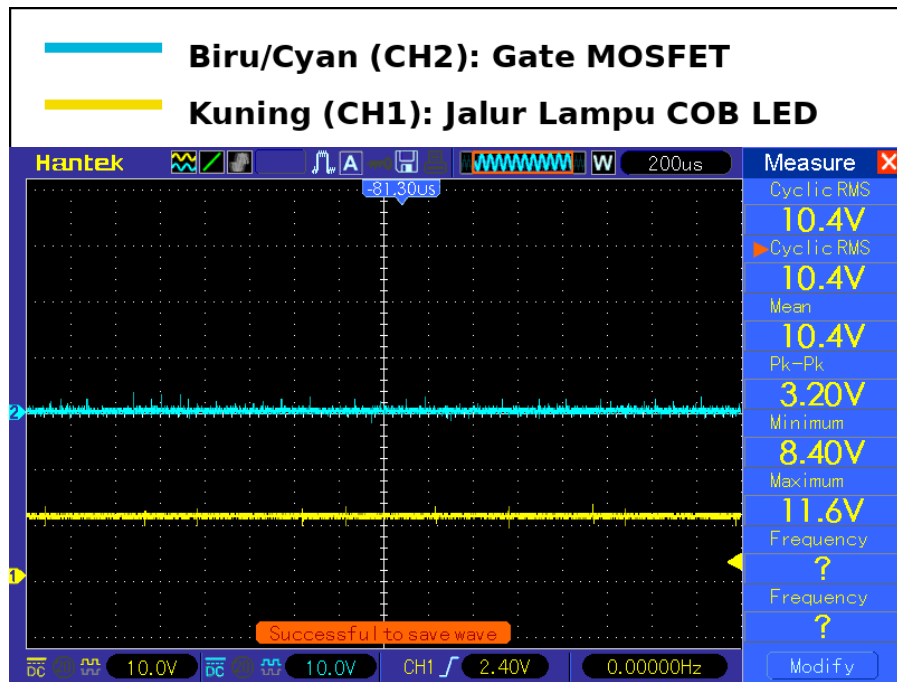
datarnya berkurang. Jalur lampu juga menunjukkan ripple, spike, dan osilasi saat transisi karena pengaruh kapasitansi gate, beban LED, kabel, dan karakteristik MOSFET. Pada sekitar 301 kHz, gelombang tidak lagi berbentuk kotak dengan jelas. Kondisi ini menunjukkan bahwa frekuensi tinggi masih terbaca, tetapi kualitas gelombangnya menurun dan rugi-rugi switching berpotensi meningkat.

5.4.2 Hasil Pengujian Osiloskop pada PWM 50%

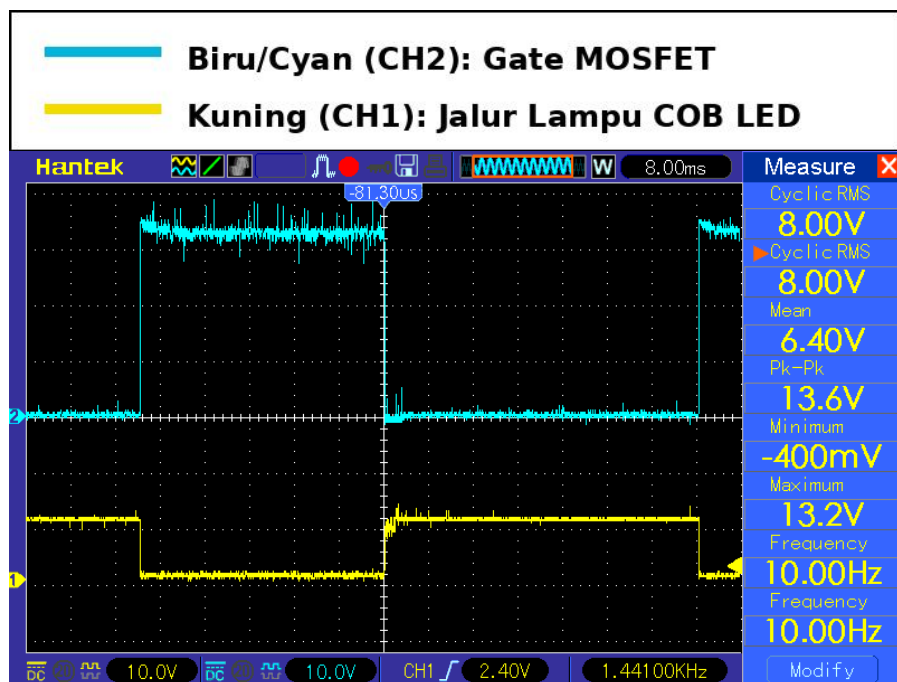
Pengujian pada PWM 50% dilakukan untuk melihat kondisi saat waktu aktif dan waktu tidak aktif MOSFET berada pada perbandingan yang relatif seimbang. Kondisi ini digunakan sebagai acuan tengah untuk membandingkan hasil PWM 30% dan PWM 70%. Tabel berikut menyajikan ringkasan pengamatan berdasarkan foto osiloskop, sedangkan dokumentasi gambar ditempatkan setelah tabel.

Tabel 5- 6 Ringkasan Pengamatan Osiloskop pada PWM 50%

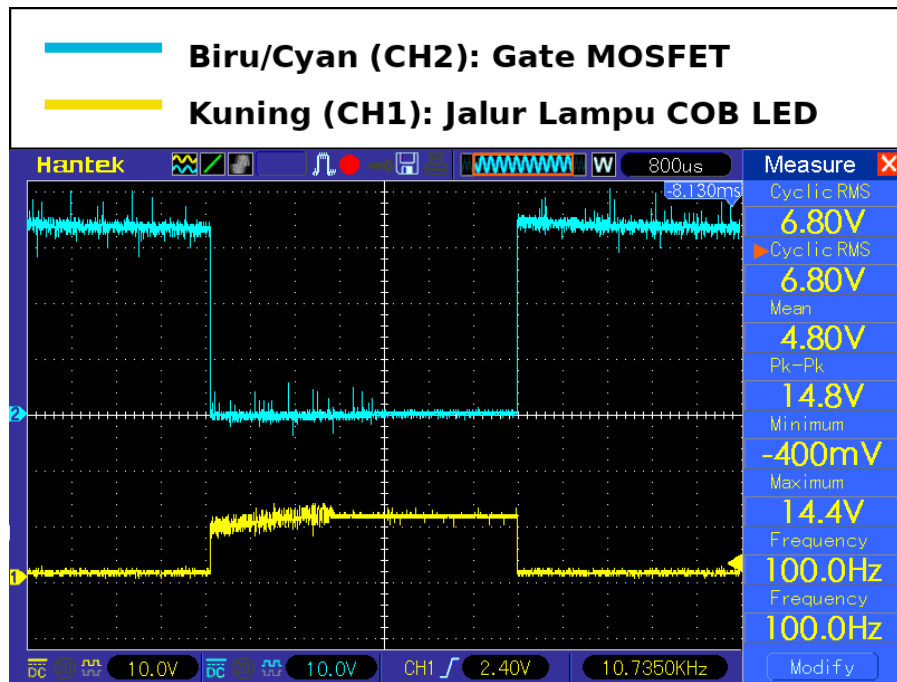
No.	Frekuensi	Ringkasan Pengamatan Berdasarkan Foto
1	1 Hz	Kedua kanal tampak mendatar karena jendela waktu terlalu pendek untuk menangkap transisi PWM 1 Hz.
2	10 Hz	Pulsa 10 Hz terlihat jelas dengan waktu ON dan OFF relatif seimbang; jalur lampu berlawanan.
3	100 Hz	Pulsa 100 Hz teratur; waktu ON dan OFF relatif seimbang dengan noise kecil saat transisi.
4	1 kHz	Pulsa 1 kHz masih kotak, tetapi waktu tinggi pada foto tampak lebih pendek daripada waktu rendah.
5	5 kHz	Pulsa 5 kHz masih jelas dan relatif seimbang; ripple kecil terlihat pada jalur lampu.
6	10 kHz	Pulsa 10 kHz tetap terbaca; tepi gate mulai melandai dan ripple tampak pada jalur lampu.
7	50 kHz	Pada 50 kHz, gate membulat dengan plateau pendek dan spike muncul pada jalur lampu.
8	100 kHz	Pada 100 kHz, gate semakin membulat dan spike tajam muncul pada kedua transisi.
9	200 kHz	Pada 200 kHz, gate tidak lagi kotak dan jalur lampu menunjukkan spike serta osilasi.
10	300 kHz	Pada sekitar 301 kHz, gate berbentuk lengkung dan jalur lampu mengalami spike serta ringing.



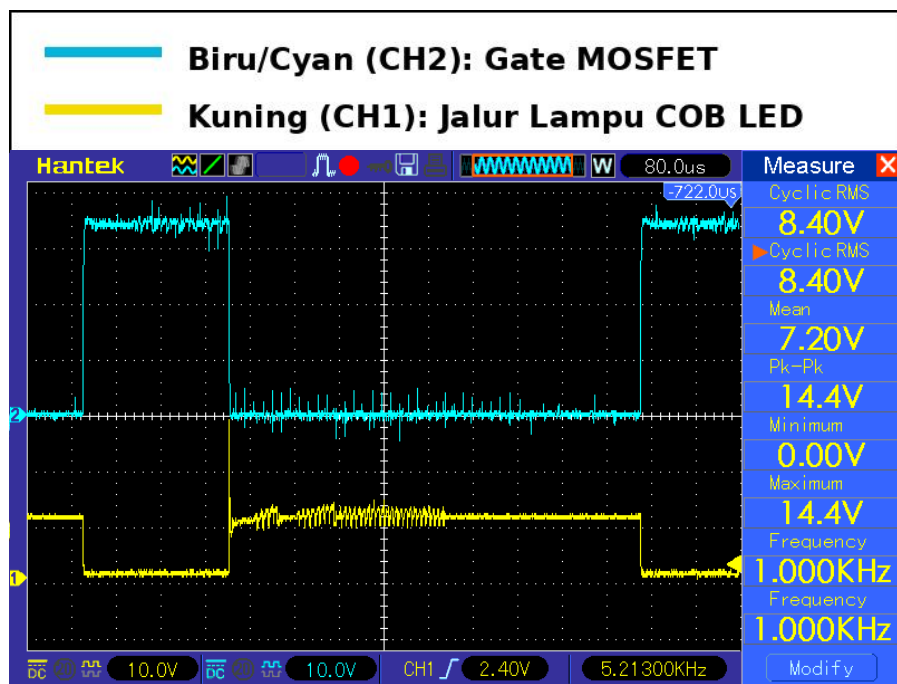
Gambar 5- 23 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 1 Hz



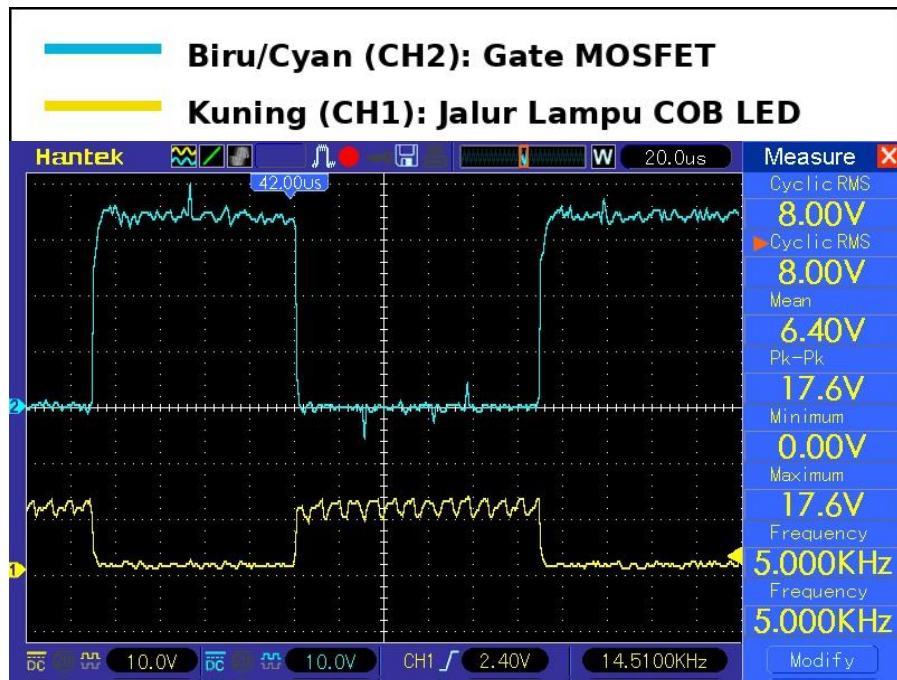
Gambar 5- 24 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 10 Hz



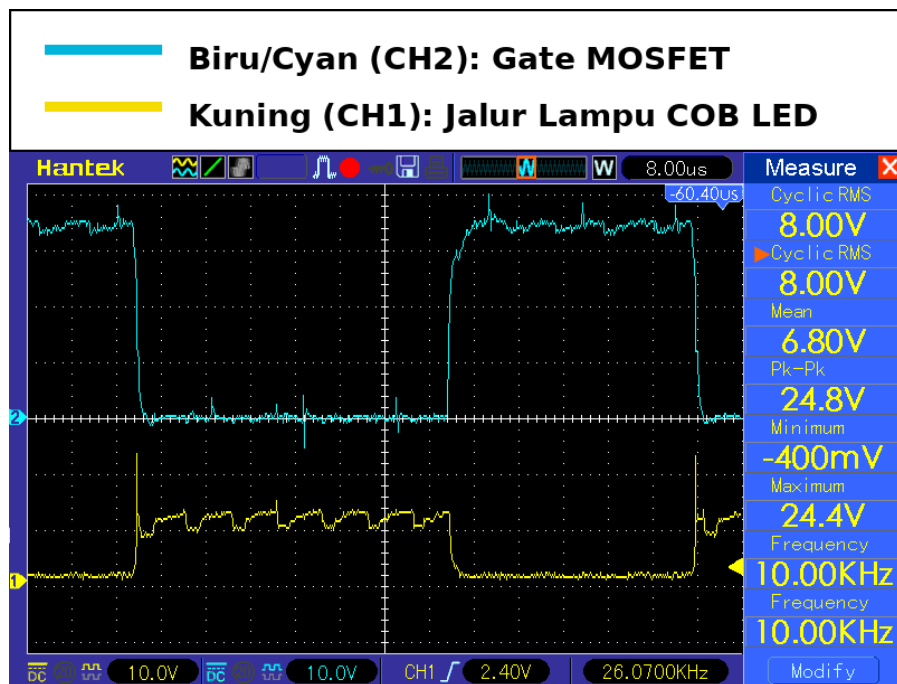
Gambar 5- 25 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 100 Hz



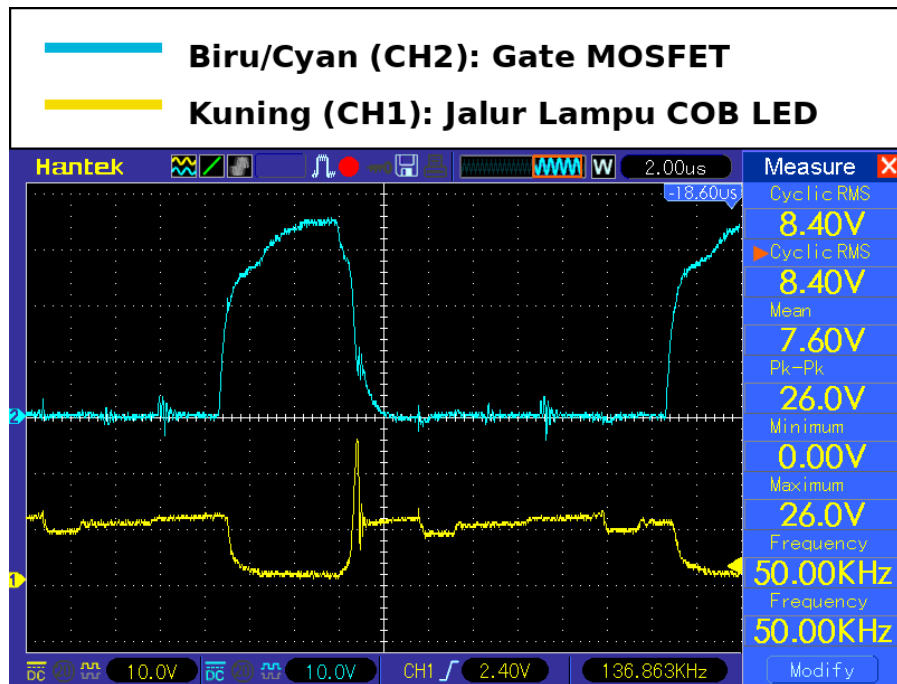
Gambar 5- 26 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 1 kHz



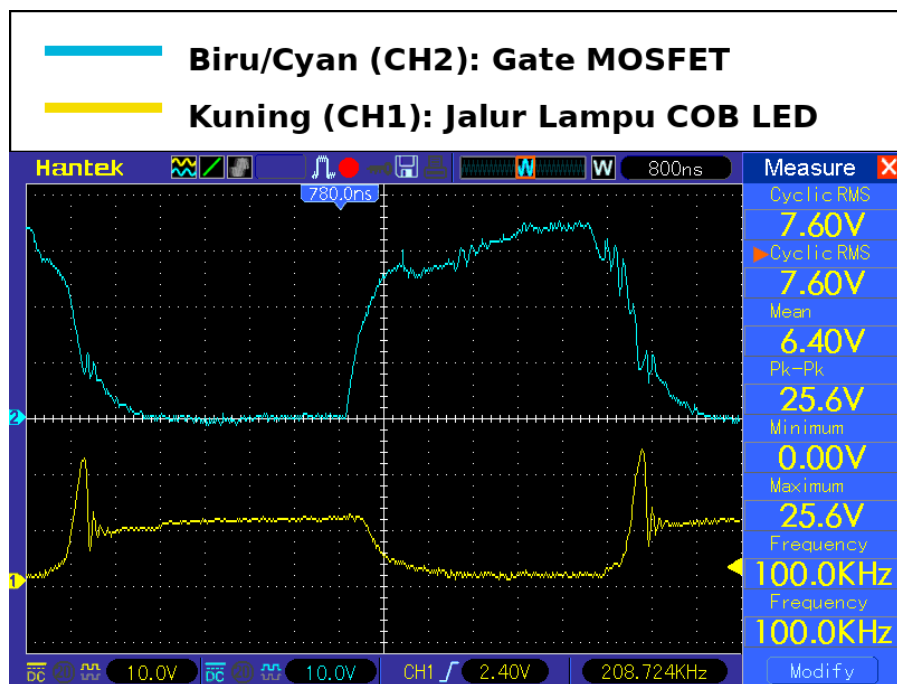
Gambar 5- 27 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 5 kHz



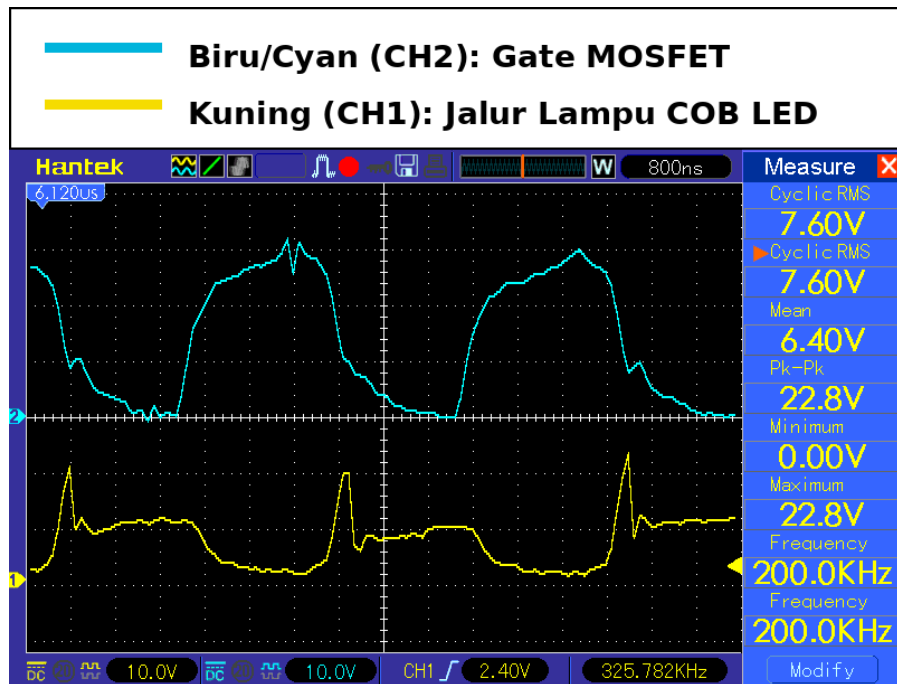
Gambar 5- 28 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 10 kHz



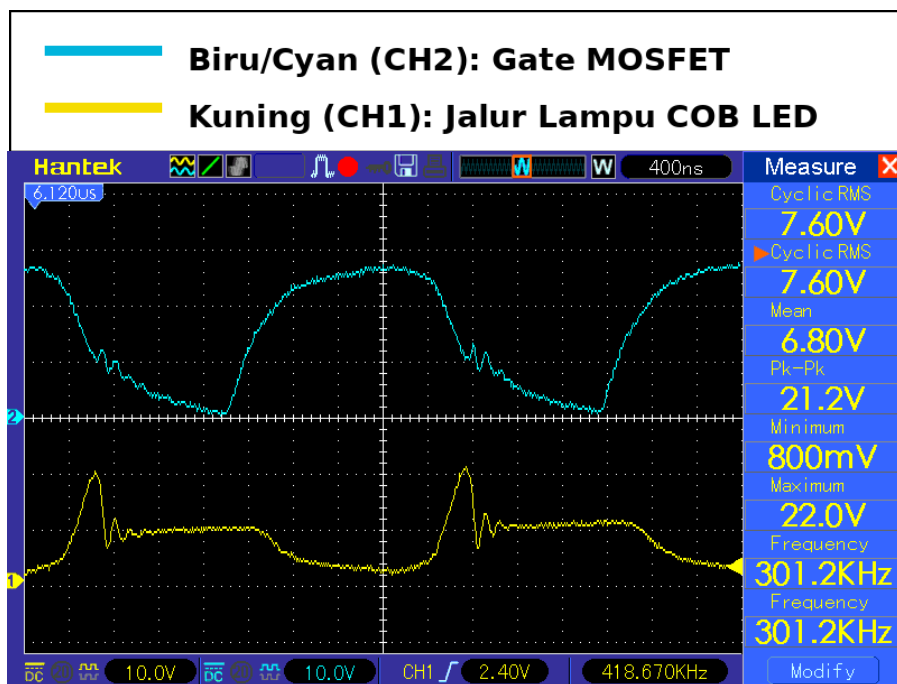
Gambar 5- 29 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 50 kHz



Gambar 5- 30 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 100 kHz



Gambar 5- 31 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 200 kHz



Gambar 5- 32 Hasil osiloskop PWM 50% pada frekuensi 300 kHz

Pada PWM 50%, sinyal gate MOSFET memiliki bagian tinggi dan rendah yang relatif seimbang pada sebagian besar gambar frekuensi rendah sampai menengah. Hal ini menunjukkan bahwa MOSFET berada pada kondisi ON dan

OFF dengan perbandingan waktu yang mendekati sama dalam satu periode gelombang. Pada frekuensi 1 Hz, kedua kanal tampak mendatar karena jendela waktu osiloskop terlalu pendek untuk menangkap periode 1 detik. Pada gambar 1 kHz, waktu tinggi justru tampak lebih pendek daripada waktu rendah, sehingga bentuk yang ditampilkan belum sepenuhnya menunjukkan keseimbangan seperti pada 10 Hz, 100 Hz, 5 kHz, dan 10 kHz.

Pada frekuensi 10 Hz sampai 10 kHz, hubungan antara sinyal gate dan jalur lampu terlihat berlawanan dan proses switching MOSFET masih dapat diamati dengan jelas. Pada frekuensi 50 kHz ke atas, bentuk gelombang mulai kurang ideal karena periode sinyal semakin pendek. Gate MOSFET membutuhkan waktu untuk proses *charge* dan *discharge*, sehingga garis biru/cyan mulai membulat dan tidak lagi memiliki tepi yang tegak. Sementara itu, garis kuning pada jalur lampu menunjukkan *ripple* dan *spike* yang semakin besar saat transisi. Pada sekitar 301 kHz, kedua sinyal tidak lagi berbentuk kotak dengan bagian datar yang jelas. Kondisi ini menjadi alasan frekuensi terlalu tinggi tidak dipilih sebagai frekuensi utama.

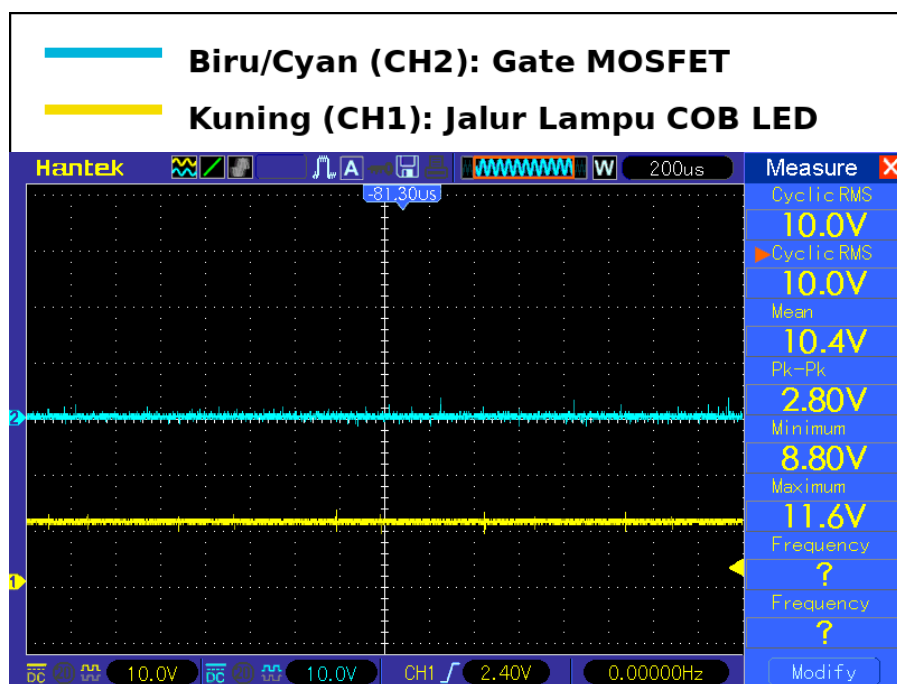
5.4.3 Hasil Pengujian Osiloskop pada PWM 70%

Pengujian pada PWM 70% dilakukan untuk melihat respon rangkaian ketika waktu aktif MOSFET lebih panjang dibandingkan waktu tidak aktifnya. Pada kondisi ini, sinyal PWM pada gate MOSFET berada pada kondisi tinggi lebih lama dalam satu periode. Pengujian ini digunakan untuk menunjukkan bahwa perubahan nilai PWM memengaruhi lebar pulsa yang diberikan kepada MOSFET.

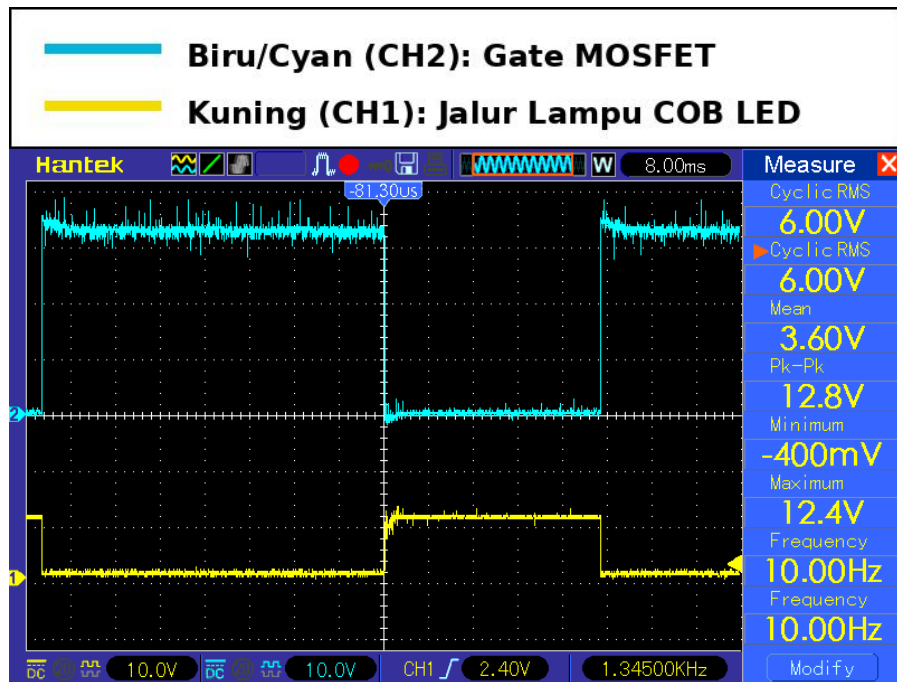
Tabel 5- 7 Ringkasan Pengamatan Osiloskop pada PWM 70%

No.	Frekuensi	Ringkasan Pengamatan Berdasarkan Foto
1	1 Hz PWM 158	Kedua kanal tampak mendatar karena jendela waktu terlalu pendek untuk menangkap transisi PWM 1 Hz.
2	10 Hz PWM 158	Pulsa 10 Hz terlihat jelas; waktu aktif gate lebih panjang dan jalur lampu berubah berlawanan.
3	100 Hz PWM 158	Pulsa 100 Hz teratur; waktu aktif gate lebih panjang dan noise kecil tampak saat transisi.

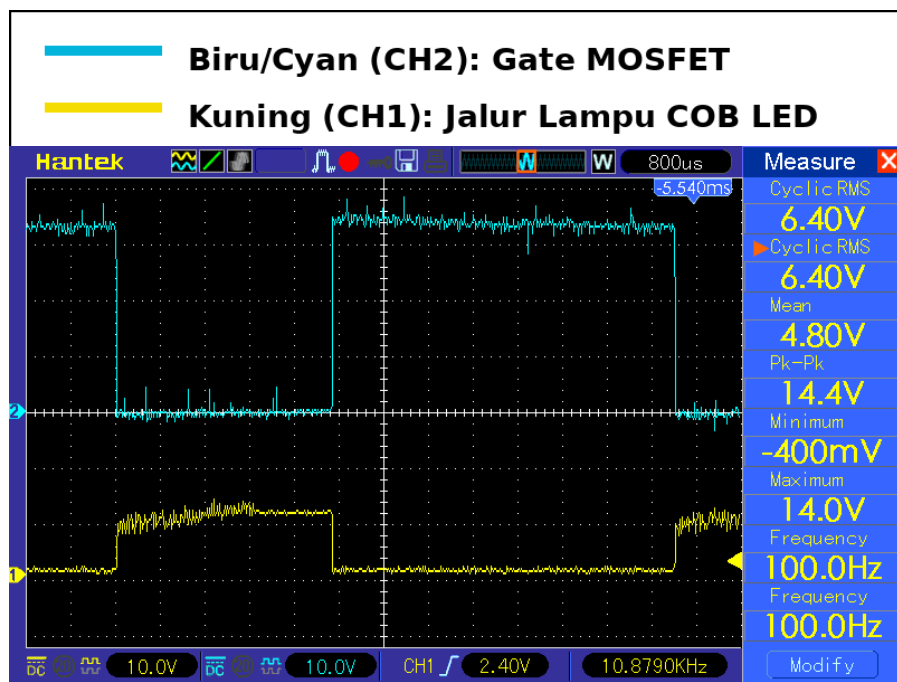
4	1 kHz PWM 158	Pulsa 1 kHz masih kotak, tetapi waktu tinggi pada foto belum tampak lebih panjang daripada waktu rendah.
5	5 kHz PWM 158	Pulsa 5 kHz masih jelas; waktu aktif gate lebih panjang dan jalur lampu berlawanan.
6	10 kHz PWM 158	Pulsa 10 kHz tetap terbaca dengan waktu aktif lebih panjang; ripple mulai tampak pada jalur lampu.
7	50 kHz PWM 158	Pada 50 kHz, gate membulat tetapi waktu aktif masih lebih panjang; spike muncul pada jalur lampu.
8	100 kHz PWM 158	Pada 100 kHz, gate semakin membulat; plateau menurun dan spike tampak pada transisi.
9	200 kHz PWM 158	Pada 200 kHz, bentuk gate terdistorsi dan jalur lampu menunjukkan beberapa lonjakan.
10	300 kHz PWM 158	Pada sekitar 302 kHz, gate tidak lagi kotak dan jalur lampu didominasi spike serta osilasi.



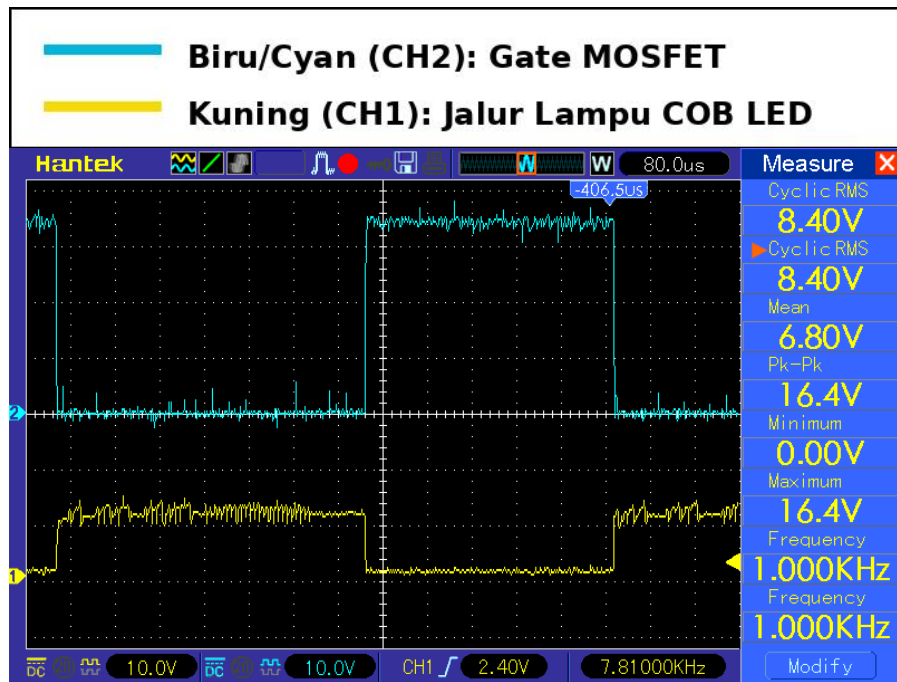
Gambar 5- 33 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 1 Hz



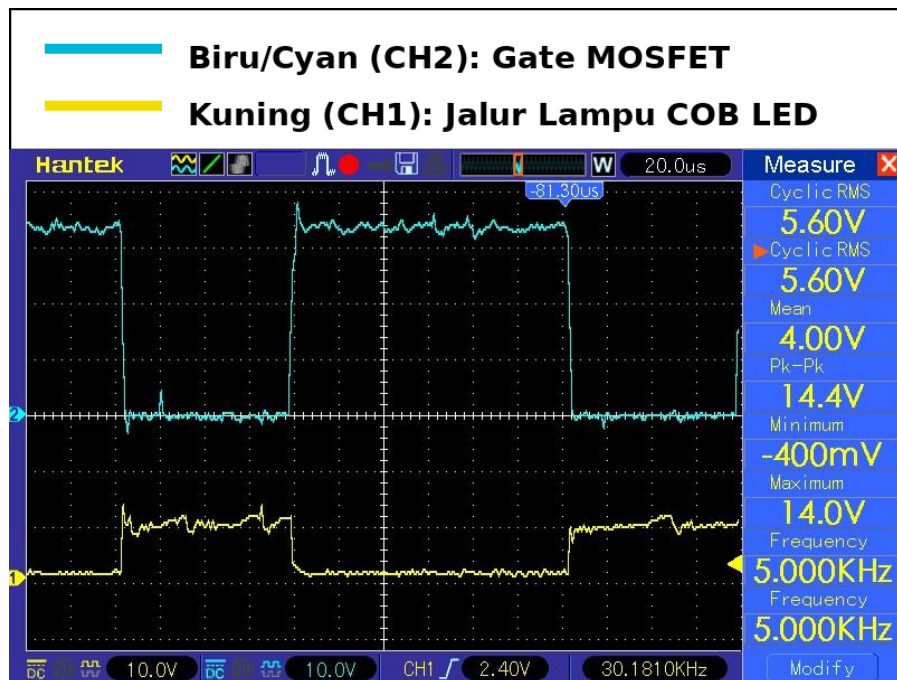
Gambar 5- 34 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 10 Hz



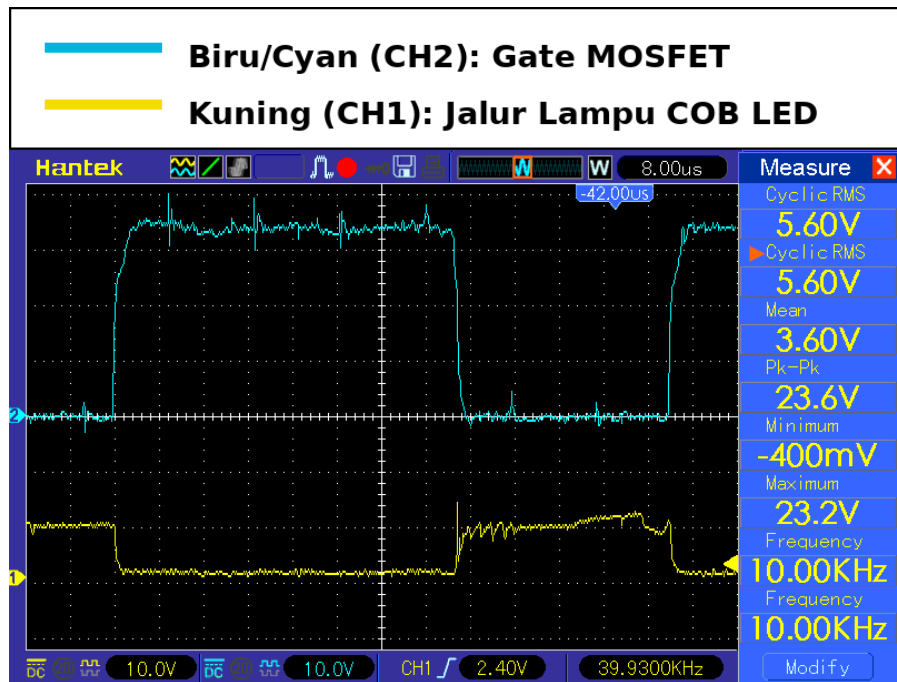
Gambar 5- 35 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 100 Hz



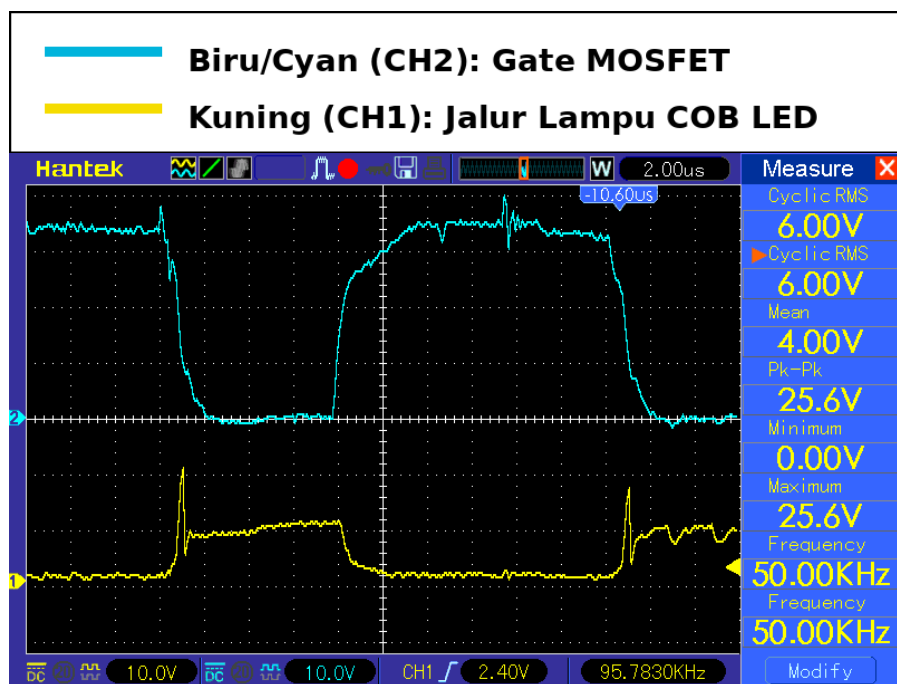
Gambar 5- 36 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 1 kHz



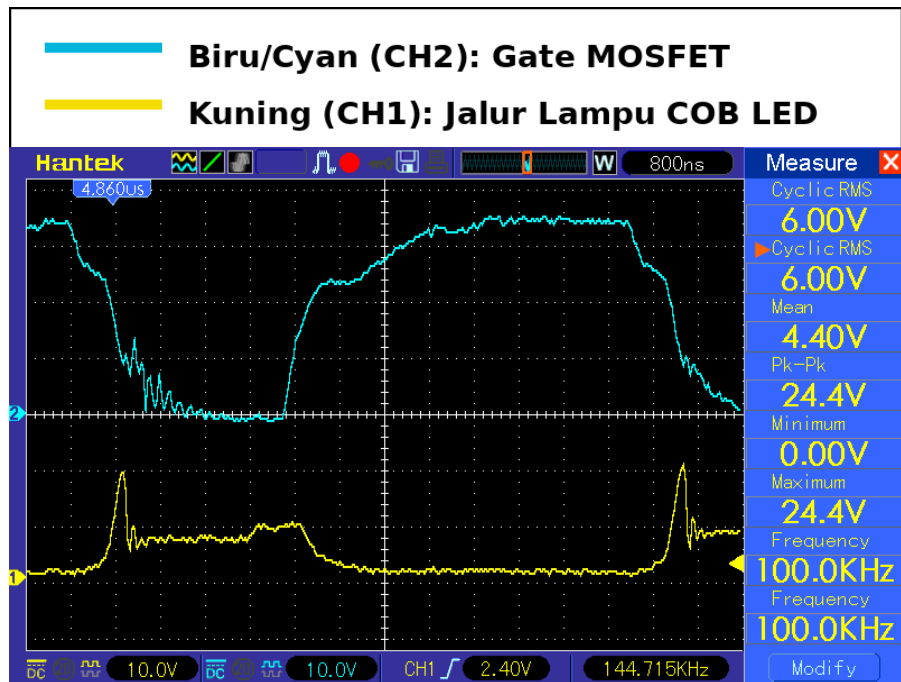
Gambar 5- 37 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 5 kHz



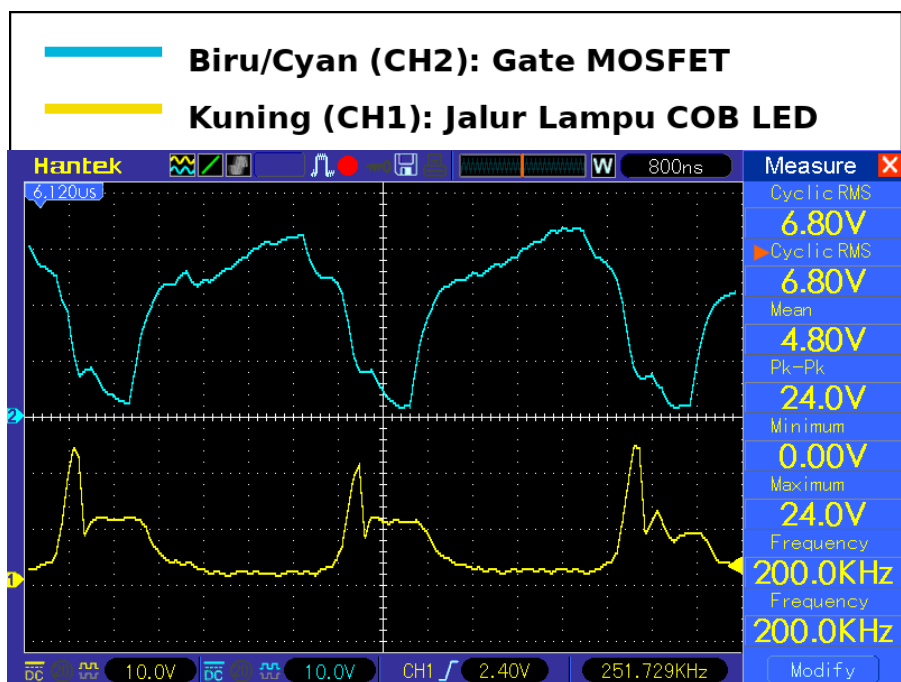
Gambar 5- 38 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 10 kHz



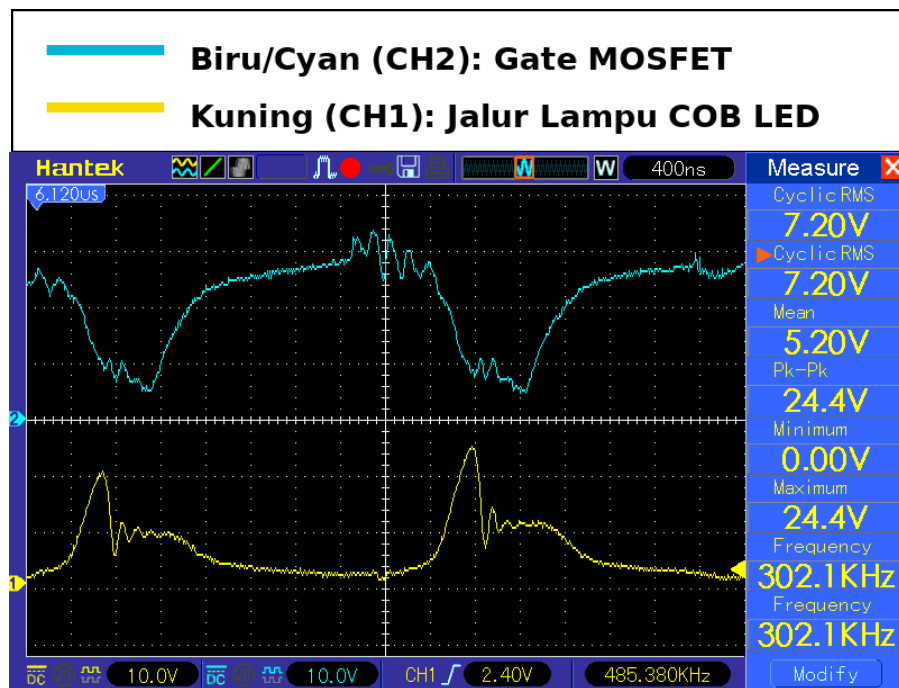
Gambar 5- 39 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 50 kHz



Gambar 5- 40 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 100 kHz



Gambar 5- 41 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 200 kHz



Gambar 5- 42 Hasil osiloskop PWM 70% pada frekuensi 300 kHz

Pada PWM 70%, bagian aktif sinyal PWM lebih panjang dibandingkan kondisi PWM 30% dan PWM 50%. Hal ini menunjukkan bahwa MOSFET menerima sinyal aktif dalam waktu yang lebih lama pada setiap periode gelombang. Semakin lama gate berada pada kondisi tinggi, semakin lama MOSFET menghantarkan arus ke lampu. Oleh karena itu, energi rata-rata yang diterima lampu menjadi lebih besar dan tingkat kecerahan lampu meningkat.

Meskipun nilai PWM memengaruhi lama waktu aktif MOSFET, kestabilan nyala lampu tetap dipengaruhi oleh frekuensi PWM. Pada 1 Hz, sinyal yang terbaca pada osiloskop cenderung mendatar, bahkan saat pengukuran dilakukan langsung pada keluaran PWM ESP32. Kondisi ini menunjukkan bahwa pulsa PWM pada 1 Hz tidak terbaca sebagai sinyal switching yang jelas, sehingga MOSFET tidak bekerja secara normal dan nyala lampu menjadi tidak stabil. Hal tersebut juga membuat respons lampu sulit diamati karena perubahan ON dan OFF tidak muncul sebagai gelombang yang jelas pada layar osiloskop. Pada 10 Hz, pulsa mulai terlihat, tetapi lampu masih berkedip cepat karena frekuensi masih rendah dan perubahan nyala-mati masih mudah terlihat oleh mata. Pada 5 kHz, lampu tampak

lebih stabil karena switching berlangsung lebih cepat dan bentuk gelombang masih dapat diamati dengan jelas pada osiloskop.

Pada frekuensi 50 kHz ke atas, pulsa menjadi semakin rapat sehingga bentuk gelombang mulai kurang ideal. Gate MOSFET tidak dapat berubah secara instan karena adanya kapasitansi gate, sedangkan jalur lampu menunjukkan *ripple* dan *spike* akibat proses switching cepat. Kondisi ini menunjukkan bahwa frekuensi yang terlalu tinggi dapat memengaruhi kualitas bentuk sinyal dan berpotensi menambah rugi-rugi switching. Oleh karena itu, frekuensi 5 kHz lebih sesuai digunakan pada sistem ini dibandingkan frekuensi yang terlalu rendah atau terlalu tinggi.

5.4.4 Analisa Pengujian Osiloskop

Berdasarkan hasil pengukuran osiloskop dua kanal, channel 2 atau garis biru/cyan menunjukkan sinyal PWM dari ESP32 menuju gate MOSFET, sedangkan channel 1 atau garis kuning menunjukkan respons tegangan pada jalur negatif lampu COB LED terhadap ground. Karena rangkaian menggunakan konfigurasi *low-side switching*, bentuk sinyal pada jalur lampu tidak selalu sama dengan sinyal gate. Saat gate bernilai tinggi, MOSFET aktif dan jalur negatif lampu tertarik mendekati ground. Sebaliknya, saat gate bernilai rendah, MOSFET tidak aktif sehingga jalur lampu berubah mengikuti kondisi beban. Oleh karena itu, garis kuning dapat terlihat berlawanan arah atau muncul lonjakan saat transisi ON dan OFF.

Perbedaan PWM 30%, 50%, dan 70% paling jelas terlihat pada gambar 10 Hz, 100 Hz, 5 kHz, dan 10 kHz. Pada PWM 30%, waktu aktif MOSFET lebih pendek. Pada PWM 50%, waktu ON dan OFF relatif seimbang. Pada PWM 70%, waktu aktif lebih panjang sehingga MOSFET menghantarkan arus lebih lama. Pada gambar 1 kHz, perbandingan pulsa PWM 50% dan PWM 70% belum sepenuhnya mengikuti pola tersebut. Namun, secara umum gambar tetap menunjukkan bahwa perubahan nilai PWM memengaruhi lebar pulsa dan energi rata-rata yang diterima lampu COB LED 100 W. Hasil pengujian frekuensi menunjukkan bahwa pada 1 Hz kedua kanal tampak mendatar karena jendela waktu osiloskop terlalu pendek

dan pembacaan frekuensi belum muncul. Pada 10 Hz, pulsa mulai terlihat jelas. Pada 100 Hz hingga 10 kHz, sinyal PWM masih berbentuk kotak dan hubungan berlawanan antara gate dengan jalur lampu dapat diamati.

Pada frekuensi tinggi, terutama 50 kHz hingga 300 kHz, bentuk gelombang mulai kurang ideal. Hal ini terjadi karena periode sinyal semakin pendek, sehingga proses pengisian dan pengosongan muatan pada gate MOSFET berlangsung sangat cepat. Akibatnya, sinyal gate mulai tampak landai atau membulat, sedangkan jalur lampu menunjukkan *ripple* dan *spike* saat transisi. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh kapasitansi gate, induktansi kabel, karakteristik beban LED, dan proses *switching* yang cepat. Pada sekitar 301-302 kHz, bagian datar gelombang hampir tidak terlihat lagi. Dengan demikian, frekuensi 5 kHz lebih sesuai digunakan karena memberikan keseimbangan antara keterbacaan sinyal, kestabilan kerja, dan beban *switching* rangkaian.

5.5 Pencatatan Data pada Google Spreadsheet

Pengujian pencatatan data pada Google Spreadsheet dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil pembacaan sensor dapat dikirim dan tersimpan secara otomatis melalui sistem IoT. Data yang dikirim oleh ESP32 terdiri dari waktu pencatatan, suhu, pembacaan cahaya, nilai PWM, tegangan, dan arus. Pengujian ini juga digunakan untuk menilai keandalan pencatatan data, yaitu dengan melihat jumlah data yang berhasil masuk, data valid, data rusak, data tidak valid, serta data yang tidak masuk sesuai interval pengiriman ideal.

Pada program alat, data dikirim secara berkala dengan interval sekitar 10 detik. Oleh karena itu, waktu antarbaris data pada Google Spreadsheet dianalisis untuk mengetahui kestabilan proses pengiriman. Apabila selisih waktu antarbaris lebih dari 10 detik, maka kondisi tersebut dikategorikan sebagai keterlambatan pencatatan dan menjadi indikasi adanya data yang tidak masuk pada waktu ideal. Hal ini penting karena sistem IoT sangat dipengaruhi oleh kestabilan koneksi Wi-Fi, proses pengiriman HTTP, dan respons dari Google Apps Script atau Google Spreadsheet.

Langkah-Langkah Pengujian Google Spreadsheet

1. Menyalakan alat dan memastikan ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi.
2. Membuka file Google Spreadsheet yang digunakan sebagai media penyimpanan data.
3. Memastikan kolom Time, SUHU, LUX, PWM, TEGANGAN, dan ARUS sudah tersedia.
4. Menjalankan program ESP32 dan menunggu proses pengiriman data berlangsung.
5. Memeriksa apakah data baru masuk ke baris berikutnya secara otomatis.
6. Mengevaluasi durasi pencatatan, jumlah data aktual, data invalid, data missing, dan keberhasilan pencatatan data.

Tabel 5- 8 Evaluasi durasi dan keberhasilan pencatatan data pada Google Spreadsheet

Timestamp Awal	Timestamp Akhir	Durasi (detik)	Jumlah Data Ideal	Jumlah Data Aktual	Keberhasilan Pencatatan
30/06/2026 18:03:07	01/07/2026 13:31:00	70.073	7.008 baris	6.776 baris	96,69%

Tabel 5-7 menunjukkan bahwa pengujian berlangsung dari 30 Juni 2026 pukul 18:03:07 sampai 1 Juli 2026 pukul 13:31:00, dengan durasi pencatatan sebesar 70.073 detik. Karena program mengirimkan data setiap 10 detik, maka jumlah data ideal diperkirakan sebesar 7.008 baris. Jumlah data aktual yang tercatat berdasarkan timestamp adalah 6.776 baris, sehingga keberhasilan pencatatan data mencapai 96,69%.

Tabel 5- 9 Evaluasi Kualitas Data Hasil Pencatatan Google Spreadsheet

Parameter	Jumlah	Keterangan	Persentase
Total data masuk	6.777 baris	Seluruh data yang berhasil masuk pada Google Spreadsheet selama pengujian.	100,00%
Data valid	6.770 baris	Data berformat benar dan berada dalam batas kewajaran pengukuran, sehingga dapat digunakan untuk analisis.	99,90%

Parameter	Jumlah	Keterangan	Persentase
Data rusak	0 baris	Tidak ditemukan baris rusak atau format data yang tidak terbaca.	0,00%
Data invalid	7 baris	Data tidak digunakan karena nilainya berada di luar batas kewajaran pengukuran.	0,10%
Estimasi data missing	232 baris	Selisih antara data ideal 7.008 baris dan data aktual 6.776 baris.	3,31%

Keterangan Tabel 5-8

1. Data rusak adalah data yang format barisnya tidak sesuai dengan format pencatatan, misalnya baris kosong, atau data yang tidak terbaca lengkap. Pada pengujian ini, data rusak berjumlah 0 baris karena seluruh baris masih memiliki format yang dapat dibaca.
2. Data invalid adalah data yang formatnya terbaca, tetapi nilai salah satu parameternya berada di luar batas kewajaran pengukuran. Contohnya nilai suhu, lux, PWM, tegangan, atau arus yang tidak sesuai dengan kondisi kerja alat. Pada pengujian ini ditemukan 7 baris data invalid.
3. Data missing adalah data yang seharusnya tercatat berdasarkan interval ideal 10 detik, tetapi tidak muncul pada Google Spreadsheet. Data missing dapat terjadi karena koneksi Wi-Fi tidak stabil, proses pengiriman data terlambat, atau respons Google Spreadsheet dan Google Apps Script tidak langsung diterima oleh ESP32.

5.5.1 Analisa Pengujian Google Spreadsheet

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pencatatan data berbasis Google Spreadsheet sudah berjalan dengan baik dari sisi format data. Total data yang berhasil masuk berjumlah 6.777 baris. Dari jumlah tersebut, terdapat 6.770 baris data valid, 0 baris data rusak, dan 7 baris data invalid. Persentase data valid sebesar 99,90% menunjukkan bahwa sebagian besar data yang dikirim ESP32 dapat tersimpan dengan format yang benar dan masih layak digunakan untuk analisis.

Data invalid tidak digunakan dalam analisis karena nilainya berada di luar batas kewajaran pembacaan sensor. Pemeriksaan dilakukan terhadap parameter

suhu, pembacaan cahaya, nilai PWM, tegangan, dan arus. Sementara itu, data rusak bernilai 0 baris, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem tidak mengalami gangguan format data seperti header berulang, baris kosong, atau kolom yang tidak lengkap.

Dari sisi waktu pencatatan, sistem belum sepenuhnya stabil pada interval tepat 10 detik. Berdasarkan durasi pengujian, jumlah data ideal yang seharusnya tercatat adalah sekitar 7.008 baris, sedangkan data aktual yang berhasil tercatat berjumlah 6.776 baris. Selisih tersebut menghasilkan estimasi data missing sebanyak 232 baris atau 3,31%. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat sebagian kecil data yang tidak masuk sesuai interval ideal.

Keterlambatan atau data missing dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kestabilan jaringan Wi-Fi, waktu respons Google Apps Script, proses pengiriman data melalui koneksi HTTP, serta proses pembacaan sensor pada ESP32. Pada sistem IoT, keterlambatan kecil masih mungkin terjadi karena proses pencatatan bergantung pada koneksi internet dan respons server. Oleh karena itu, meskipun hasil pencatatan sudah cukup baik, sistem tetap dapat dikembangkan dengan menambahkan penyimpanan lokal seperti SD card atau memori sementara agar data tetap tersimpan ketika koneksi internet terganggu.