

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem secara menyeluruh dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh bagian dari alat pendeteksi sambaran petir dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Pengujian ini mencakup pemeriksaan terhadap integrasi antara perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), serta *respons* sistem terhadap kondisi lingkungan secara langsung di lapangan.

Tahap awal pengujian dilakukan terhadap sensor BME280 yang digunakan untuk mengukur parameter suhu, tekanan udara, dan kelembapan. Data hasil pembacaan dari sensor ini ditampilkan secara bergiliran melalui layar LCD 16x2. sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor BME280 memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan bekerja secara stabil dalam kondisi lingkungan normal. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap modul GPS NEO-6M yang berfungsi untuk mendapatkan informasi koordinat lokasi. Pada pengujian ini, modul GPS membutuhkan waktu sekitar 30 hingga 70 detik untuk memperoleh sinyal satelit secara penuh. Setelah sinyal berhasil terkunci, data lintang dan bujur ditampilkan di LCD dan secara bersamaan dikirimkan ke Google Spreadsheet menggunakan koneksi Wi-Fi dari ESP32. Koordinat yang ditampilkan telah sesuai dengan lokasi sebenarnya di lapangan, dengan deviasi lokasi yang masih dalam batas toleransi umum sebesar ± 5 meter.

Tahap pengujian utama difokuskan pada kinerja rangkaian pendeteksi sambaran petir berbasis sinyal *electromagnetic pulse*. Rangkaian ini terdiri dari antena teleskopik sebagai penerima sinyal elektromagnetik, rangkaian penguat (amplifier), penyaring sinyal (filter), serta penyearah dan pembanding untuk menghasilkan pulsa digital saat terjadi deteksi. Untuk menguji fungsionalitas sistem ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan sumber interferensi elektromagnetik seperti percikan listrik dari pemantik korek api. Sinyal gangguan ini menyerupai pola gelombang elektromagnetik yang ditimbulkan oleh petir alami.

Ketika sinyal diterima oleh antena dan diproses oleh rangkaian, sistem memberikan respons lokal berupa aktifnya buzzer dan indikator LED. Selain itu, jumlah deteksi akan dihitung dan ditampilkan pada LCD. Nilai deteksi tersebut juga dikirimkan secara otomatis ke Google Spreadsheet sebagai notifikasi dalam bentuk *real-time* data. Sistem bekerja dengan respon waktu rata-rata 1–2 detik setelah sinyal diterima, menunjukkan bahwa sensor buatan ini cukup responsif terhadap gangguan elektromagnetik yang signifikan.

5.2 Pengujian Sensor Buatan

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sensor buatan yang dirancang dapat bekerja secara optimal dalam mendeteksi aktivitas sambaran petir berdasarkan prinsip penerimaan gelombang elektromagnetik. Sensor ini memanfaatkan antena teleskopik sebagai penerima sinyal *electromagnetic pulse* yang dihasilkan oleh petir, kemudian diproses melalui rangkaian penguat (amplifier), penyaring sinyal (filter), dan dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 sebagai input digital.

Pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, yang mencakup integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak, serta respons sistem terhadap kondisi lapangan. Pada tahap awal, dilakukan verifikasi bahwa seluruh komponen elektronik seperti rangkaian penerima sinyal, indikator buzzer, layar LCD, dan koneksi Wi-Fi bekerja secara terpadu. Sistem juga diuji dalam kondisi diam atau tidak aktif untuk mengamati kestabilan sensor dalam kondisi lingkungan tanpa petir, guna memastikan tidak terjadi *false detection*.

Pengujian sensor dilakukan di lingkungan terbuka, terutama pada saat kondisi cuaca langit mendung atau hujan, agar meningkatkan peluang terjadinya sambaran petir alami. Sistem diposisikan secara statis di lokasi dengan minim gangguan elektromagnetik dari sumber buatan agar hasil deteksi lebih akurat. Ketika sensor mendeteksi sambaran petir, sistem akan memberikan respons berupa bunyi buzzer, penambahan nilai pada counter, serta tampilan informasi pada layar LCD 16x2. Selain itu, data hasil deteksi secara otomatis dikirimkan ke Google Spreadsheet dan ditampilkan melalui *real-time Monitoring*.

Selain pengujian terhadap petir alami, dilakukan juga simulasi dengan menggunakan sumber gangguan elektromagnetik seperti percikan dari pemantik korek api dikarenakan percikan ini menghasilkan medan elektromagnetik sesaat. Simulasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor mampu menangkap sinyal yang menyerupai karakteristik gelombang elektromagnetik dari sambaran petir. *Respons* sistem dalam pengujian simulasi ini dinilai dari waktu reaksi dan konsistensi aktivasi buzzer serta tampilan informasi pada LCD.

5.2.1 Pengujian Simulasi Terhadap Sensor

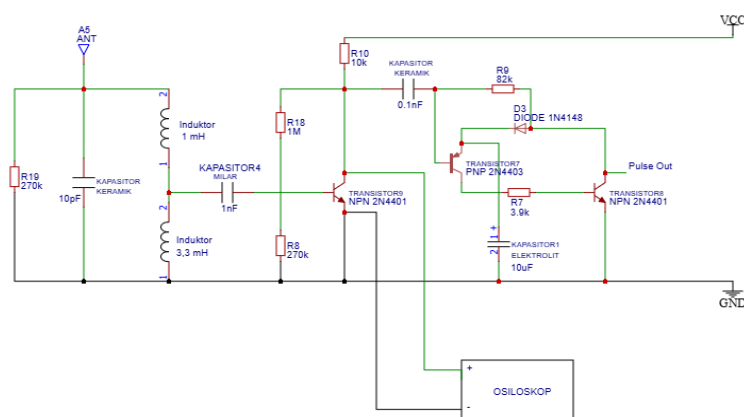
Pengujian simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi gangguan elektromagnetik (EMP) yang dihasilkan menggunakan sumber gangguan buatan berupa pemantik korek api tipe piezoelektrik. Meskipun bukan merupakan sumber petir alami, alat ini mampu menghasilkan impuls elektromagnetik yang menyerupai fenomena sambaran petir dalam bentuk sederhana.

Pemantik korek api piezoelektrik bekerja berdasarkan prinsip efek piezoelektrik, yaitu kemampuan kristal piezo untuk menghasilkan tegangan tinggi ketika diberikan tekanan mekanis. Tegangan tinggi tersebut dilepaskan secara cepat dalam bentuk loncatan listrik atau percikan, yang memancarkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi. Impuls ini terjadi dalam durasi yang sangat singkat, namun cukup kuat untuk menimbulkan gangguan elektromagnetik di sekitar alat.

Rangkaian deteksi EMP yang dikembangkan dirancang untuk menangkap perubahan medan elektromagnetik secara tiba-tiba, sebagaimana terjadi pada proses pelepasan muatan listrik (*discharge*) saat terjadi sambaran petir. Oleh karena itu, pemantik korek api digunakan sebagai sumber uji simulasi untuk mengetahui sejauh mana sistem mampu mendeteksi gangguan elektromagnetik impulsif yang menjadi indikator utama dari peristiwa sambaran petir. Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

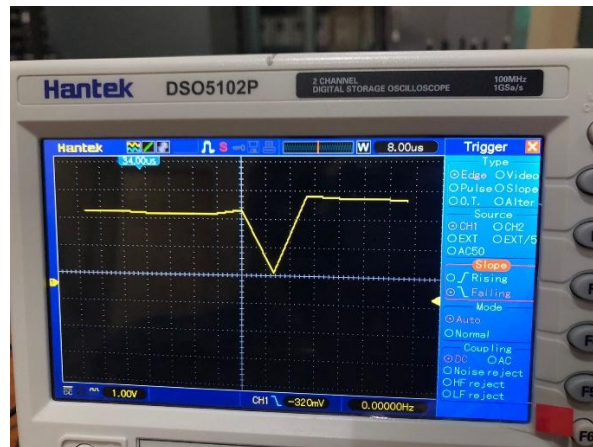
1. Menyiapkan perangkat system pendeteksi petir yang telah terpasang lengkap.
2. Pastikan perangkat telah menyala dan ESP32 terhubung dengan jaringan Wi-Fi sehingga dapat mengirim data secara *real-time* ke Google Spreadsheet sebagai *Monitoring*.
3. Mengatur Antena secara vertikal dengan panjang berbeda (misalnya 10 cm, 20 cm, dan 30 cm) untuk mengamati pengaruh panjang antena terhadap sensitivitas sensor terhadap sinyal EMP.
4. Melakukan simulasi percikan dari pemantik piezoelektrik dengan cara didekatkan ke antena pada jarak bervariasi antara 5 cm dan 10 cm, kemudian dipicu untuk menghasilkan percikan api.
5. Mengamati respons sistem terhadap percikan dengan memperhatikan aktivasi buzzer, nilai deteksi pada LCD, dan data yang dikirim ke Google Spreadsheet saat percikan terjadi. Hal ini menunjukkan apakah sistem berhasil mendeteksi sinyal EMP.

Sebelum hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel, terlebih dahulu disajikan bentuk gelombang dari sinyal yang berhasil ditangkap selama proses simulasi. Gambar gelombang ini berfungsi untuk memberikan gambaran visual mengenai karakteristik impuls elektromagnetik yang dideteksi oleh sistem, sehingga dapat memperkuat analisis terhadap data yang diperoleh.



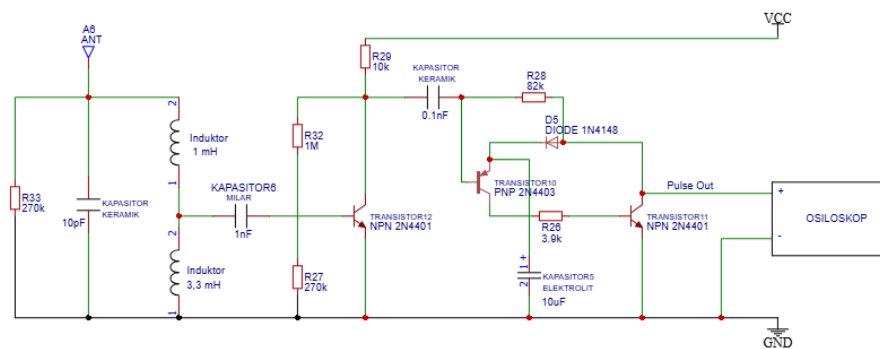
Gambar 5. 1 Pengukuran sinyal keluaran sensor EMP menggunakan osiloskop

Pada gambar 5.1 di atas menunjukkan bahwa titik pengukuran osiloskop dihubungkan ke kaki transistor bagian kolektor, sehingga gelombang yang muncul pada layar osiloskop merupakan hasil penguatan dan pembentukan sinyal dari rangkaian. Berikut dibawah ini gambar hasil gelombang pada osiloskop.



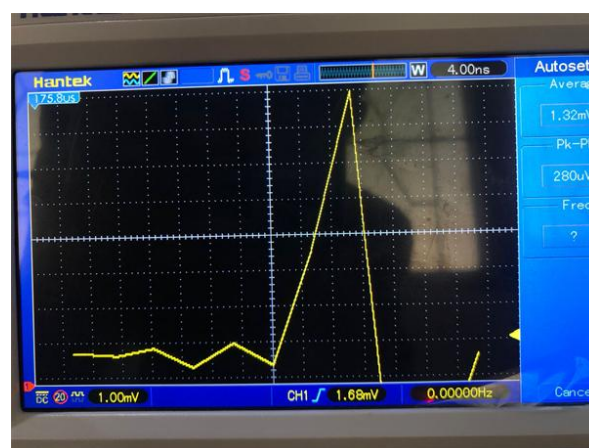
Gambar 5. 2 Bentuk sinyal input impuls dari pemantik piezoelektrik

Pada gambar 5.2 menunjukkan bentuk sinyal ketika sistem menerima input berupa impuls elektromagnetik dari pemantik piezoelektrik. Terlihat adanya perubahan mendadak pada gelombang berupa lonjakan tajam ke arah negatif dengan nilai puncak sekitar -320 mV dan durasi sekitar $8\text{ }\mu\text{s}$. Nilai rata-rata tegangan selama impuls sekitar -160 mV . Respon ini mengindikasikan bahwa rangkaian deteksi berhasil menangkap sinyal impuls yang muncul secara singkat akibat pelepasan muatan listrik (*discharge*). Setelah impuls terjadi, sinyal kembali ke kondisi normal, menunjukkan bahwa rangkaian bekerja secara cepat dalam merespons trigger eksternal. Kondisi penurunan tegangan tersebut merepresentasikan status logika LOW, yang menjadi indikator bahwa sistem berhasil mengenali adanya impuls dari sumber eksternal.



Gambar 5. 3 Pengukuran *pulse out* sensor EMP menggunakan osiloskop

Pada gambar 5.3 menunjukkan skema rangkaian deteksi impuls elektromagnetik yang dihubungkan langsung dengan osiloskop pada titik keluaran (*Pulse Out*). Dengan pengukuran yang dilakukan pada titik keluaran (*Pulse Out*), osiloskop dapat merekam bentuk sinyal hasil pemrosesan rangkaian. Hasil yang diharapkan adalah munculnya pulsa sesaat ketika ada impuls elektromagnetik dari pemantik atau sambaran petir buatan, sehingga dapat dipastikan bahwa rangkaian berhasil mendeteksi, memperkuat, dan menyalurkan sinyal tersebut dalam bentuk gelombang yang lebih jelas. Berikut dibawah ini gambar hasil gelombang pada osiloskop.



Gambar 5. 4 Bentuk Gelombang pada *Pulse Out*

Pada gambar 5.4 menunjukkan bentuk sinyal pada *Pulse Out* dari rangkaian setelah menerima impuls elektromagnetik dari pemantik piezoelektrik terlihat lonjakan tajam ke arah positif dengan nilai puncak sekitar +1,68 mV, lebar impuls ± 10 ns, dan waktu naik sekitar 4 ns. Respon ini menandakan bahwa rangkaian berhasil mengolah sinyal input yang diterima sensor dan mengubahnya menjadi sinyal keluaran dengan status logika *HIGH*. Dengan demikian, dapat dipastikan bahwa sistem tidak hanya mampu mendeteksi impuls, tetapi juga memberikan respon output yang sesuai dengan perubahan kondisi input.

Pulse Out menjadi active *HIGH* karena konfigurasi rangkaian menggunakan transistor PNP/NPN sehingga ketika impuls EMP (pada node input) muncul, transistor PNP akan menghantarkan arus dari V_{cc} ke node keluaran (menyebabkan lonjakan positif di *Pulse Out*). Diode 1N4148 dan kombinasi resistor–kapasitor membentuk jalur pemicu dan pembentukan lebar pulsa (*timing*), sehingga kejadian impuls yang sangat cepat pada tampilan osiloskop terkonversi menjadi pulsa keluaran positif.

Dibawah ini adalah table 5-1 sampai 5-3 hasil pengujian simulasi menggunakan pemantik korek api berdasarkan ketinggian antena teleskopik dan jarak ke antena:

Table 5- 1 Hasil Pengujian Simulasi 1

No	Jarak Pemantik	Ketinggian Antena (cm)	Sensor AS3935	Sensor Buatan
1	5	10	Terdeteksi	Terdeteksi
2			Terdeteksi	Terdeteksi
3			Terdeteksi	Terdeteksi
4			Terdeteksi	Terdeteksi
5			Terdeteksi	Terdeteksi
6			Terdeteksi	Terdeteksi
7			Terdeteksi	Terdeteksi
8			Terdeteksi	Terdeteksi
9			Terdeteksi	Terdeteksi
10			Terdeteksi	Terdeteksi
11		20	Terdeteksi	Terdeteksi

No	Jarak Pemantik	Ketinggian Antena (cm)	Sensor AS3935	Sensor Buatan
12			Terdeteksi	Terdeteksi
13			Terdeteksi	Terdeteksi
14			Terdeteksi	Terdeteksi
15			Terdeteksi	Terdeteksi
16			Terdeteksi	Terdeteksi
17			Terdeteksi	Terdeteksi
18			Terdeteksi	Terdeteksi
19			Terdeteksi	Terdeteksi
20			Terdeteksi	Terdeteksi
21		30	Tidak	Terdeteksi
22			Tidak	Terdeteksi
23			Tidak	Terdeteksi
24			Terdeteksi	Terdeteksi
25			Tidak	Terdeteksi
26			Terdeteksi	Terdeteksi
27			Tidak	Terdeteksi
28			Tidak	Terdeteksi
29			Tidak	Terdeteksi
30			Tidak	Terdeteksi

Table 5- 2 Hasil Pengujian Simulasi 2

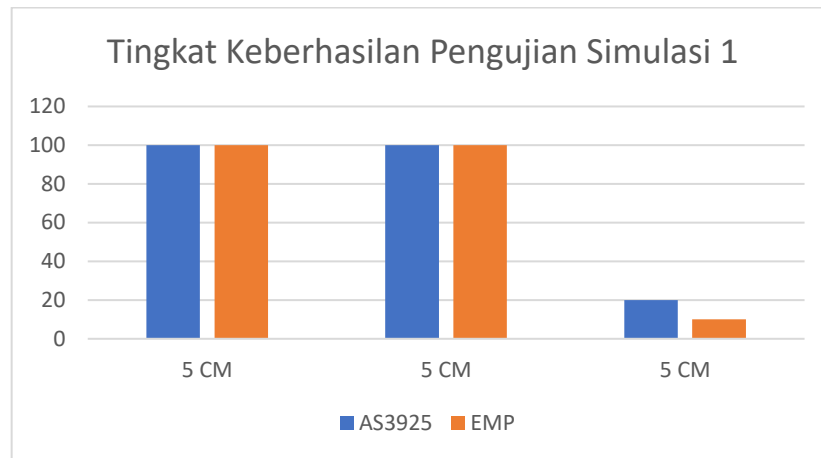
No	Jarak Pemantik	Ketinggian Antena (cm)	Sensor AS3935	Sensor Buatan
1	10	10	Terdeteksi	Tidak
2			Terdeteksi	Terdeteksi
3			Terdeteksi	Terdeteksi
4			Terdeteksi	Terdeteksi
5			Terdeteksi	Terdeteksi
6			Terdeteksi	Tidak
7			Terdeteksi	Tidak
8			Terdeteksi	Terdeteksi
9			Terdeteksi	Terdeteksi
10			Terdeteksi	Tidak
11		20	Terdeteksi	Tidak
12			Terdeteksi	Tidak
13			Terdeteksi	Tidak

No	Jarak Pemantik	Ketinggian Antena (cm)	Sensor AS3935	Sensor Buatan
14			Terdeteksi	Terdeteksi
15			Terdeteksi	Terdeteksi
16			Terdeteksi	Tidak
17			Terdeteksi	Terdeteksi
18			Terdeteksi	Terdeteksi
19			Terdeteksi	Terdeteksi
20			Terdeteksi	Tidak
21		30	Tidak	Terdeteksi
22			Tidak	Terdeteksi
23			Tidak	Terdeteksi
24			Tidak	Terdeteksi
25			Tidak	Terdeteksi
26			Tidak	Tidak
27			Tidak	Tidak
28			Tidak	Terdeteksi
29			Tidak	Tidak
30			Tidak	Terdeteksi

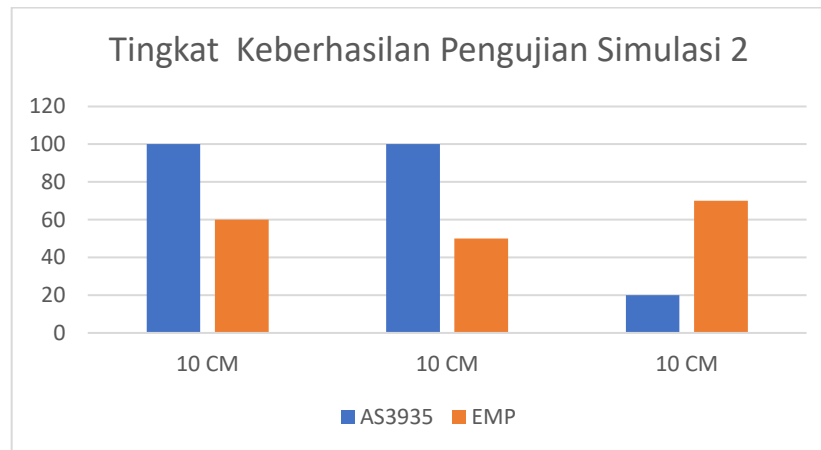
Table 5- 3 Hasil Tingkat Keberhasilan Pengujian Simulasi

Jarak Pemantik (cm)	Ketinggian Antena (cm)	Sensor AS3935 (%)	Sensor Buatan (%)
5 cm	10 cm	100	100
	20 cm	100	100
	30 cm	20	100
10 cm	10 cm	100	60
	20 cm	100	50
	30 cm	20	70

Untuk memvisualisasikan perbandingan performa kedua sensor, dibuat grafik batang tingkat keberhasilan deteksi yang dipisahkan berdasarkan jarak pemantik, berikut dibawah ini gambar 5. 5 Grafik Tingkat Keberhasilan Pengujian Simulasi 1 dan gambar 5. 6 Grafik Tingkat Keberhasilan Pengujian Simulasi 2.



Gambar 5. 5 Grafik Tingkat Keberhasilan Pengujian Simulasi 1



Gambar 5. 6 Grafik Tingkat Keberhasilan Pengujian Simulasi 2

Pada pengujian simulasi tersebut kita dapat mengetahui tingkat probabilitas keberhasilan deteksi dengan menggunakan perhitungan sebagai berikut ini:

$$P_{deteksi} = \frac{N_{terdeteksi}}{N_{total}} \times 100\% \quad \text{Rumus 5. 1}$$

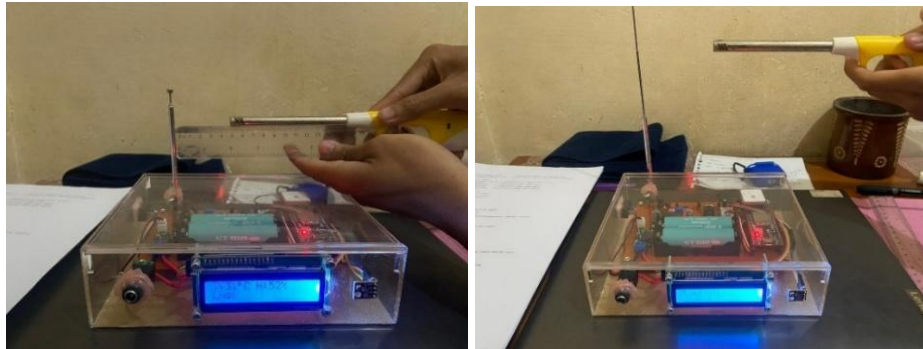
$N_{terdeteksi}$ = jumlah percobaan yang berhasil mendeteksi sinyal
 N_{total} = total jumlah percobaan yang dilakukan.

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa Sensor AS3935 lebih stabil mendeteksi dibanding EMP, terutama pada jarak 5 cm., sedangkan pada jarak 10 cm AS3935 tetap unggul pada dua percobaan awal namun mengalami penurunan signifikan pada percobaan ketiga yang justru diikuti peningkatan performa EMP, sehingga secara keseluruhan AS3935 lebih konsisten sedangkan EMP menunjukkan performa yang lebih bervariasi tergantung kondisi pengujian.

Berikut adalah perbedaan utama antara pengujian menggunakan pemantik korek dan sambaran petir alami:

1. Skala Energi : Energi yang dihasilkan oleh pemantik korek sangat kecil, hanya beberapa mikrojoule hingga millijoule, sedangkan sambaran petir alami dapat menghasilkan energi dalam kisaran ratusan megajoule
2. Arus dan Tegangan : Arus dan tegangan yang dihasilkan pemantik korek berada pada skala rendah, biasanya hanya menghasilkan percikan kecil, sedangkan petir alami memiliki arus puncak yang dapat mencapai puluhan hingga ratusan kiloampere dengan tegangan hingga ratusan juta volt.
3. Durasi Pulsa : Pulsa dari pemantik korek memiliki durasi yang sangat singkat dan sederhana, sedangkan sambaran petir alami memiliki struktur pulsa kompleks yang dapat berlangsung dari mikrodetik hingga beberapa ratus milidetik.
4. Spektrum Frekuensi : Spektrum frekuensi yang dihasilkan pemantik korek sangat terbatas dan tidak mencakup rentang penuh frekuensi elektromagnetik yang dihasilkan oleh petir alami, khususnya pada pita VLF (*Very Low Frequency*) hingga UHF (*Ultra High Frequency*).
5. Jarak dan Penyebaran pada kondisi lapangan, sinyal petir akan dipengaruhi oleh jarak, perambatan gelombang dan interferensi lingkungan, sedangkan dalam uji simulasi menggunakan pemantik dilakukan sangat dekat.

Sensitivitas AS3935 lebih konsisten dan cenderung unggul, sedangkan EMP hanya lebih baik pada kondisi tertentu. Pada pengujian simulasi dapat dijelaskan oleh perbedaan energi dan spektrum sinyal yang dihasilkan pemantik dibanding petir sesungguhnya.



Gambar 5. 7 Dokumentasi pada pengujian simulasi deteksi petir



Gambar 5. 8 Tampilan LCD saat sistem mendeteksi percikan (simulasi petir)

Pada gambar diatas 5.7 dan 5.8 adalah gambar saat melakukan pengujian dan tampilan hasil Ketika *pulse* terdeteksi. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola hubungan antara panjang antenna, jarak sumber loncatan api, dan respon sistem terhadap sinyal *electromagnetic pulse*. Selanjutnya, pengujian akan dilakukan pada kondisi lapangan untuk mengevaluasi performa sensor dalam mendeteksi sinyal elektromagnetik sambaran petir sebenarnya, serta membandingkan hasilnya dengan pengujian simulasi ini.

5.2.2 Pengujian Lapangan

Setelah dilakukan pengujian simulasi menggunakan pematik korek, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian sensor buatan secara langsung di lingkungan terbuka. Pengujian lapangan ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sensor *electromagnetic pulse* (EMP) dalam kondisi nyata, khususnya saat terjadi

fenomena petir alami. Melalui pengujian ini, dapat diketahui seberapa responsif dan akurat sistem dalam mendeteksi sinyal elektromagnetik yang dihasilkan oleh sambaran petir, serta menguji kestabilan sistem dalam menghadapi kondisi lingkungan yang dinamis. Data yang diperoleh akan menjadi dasar untuk menganalisis efektivitas sistem secara menyeluruh. Adapun langkah-langkah pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor buatan dalam mendeteksi sinyal *electromagnetic pulse* (EMP) yang ditimbulkan oleh aktivitas petir alami di lingkungan terbuka. Berikut prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan perangkat sistem deteksi petir yang digunakan.
2. Memastikan sistem menyala dengan baik dan ESP32 telah terhubung ke jaringan Wi-Fi, agar data hasil deteksi dapat dikirim secara *real-time* ke Google Spreadsheet sebagai *Monitoring*.
3. Menentukan lokasi pengujian di area terbuka, untuk meningkatkan akurasi deteksi terhadap sinyal EMP dari petir alami.
4. Mengatur antena teleskopik dalam posisi vertikal dengan panjang maksimal (± 30 cm) untuk memperoleh sensitivitas maksimum dalam menerima gelombang elektromagnetik dari langit.
5. Mengamati respons sistem secara langsung, seperti aktivasi buzzer, perubahan nilai pada LCD, serta pengiriman data ke Google Spreadsheet, yang menunjukkan adanya deteksi sinyal EMP dari kilatan cahaya atau suara petir.
6. Melakukan pencatatan kondisi lingkungan saat pengujian berlangsung, seperti waktu kejadian, kondisi cuaca, dan parameter dari sensor BME280 (suhu, kelembaban, dan tekanan udara) sebagai data pendukung.
7. Mencatat hasil deteksi secara lengkap, termasuk waktu deteksi, nilai yang ditampilkan pada LCD, suara buzzer, dan data yang masuk ke Google Spreadsheet, guna dilakukan analisis lebih lanjut terhadap akurasi dan sensitivitas sistem.

Pengujian lapangan dilakukan pada hari minggu 03 Agustus 2025 pukul 18.15 WIB hingga 19.00 WIB, bertempat di Kawasan terbuka Rooftop Kos an di Kota

Semarang, Jawa Tengah. Berikut dibawah ini adalah gambar 5.9 saat melakukan pengujian dilapangan.



Gambar 5. 9 Pengujian di Lapangan

Berikut ini data tabel 5- 4 adalah hasil pengujian dilapangan terhadap aktivitas petir.

Tabel 5- 4 Hasil Pengujian di Lapangan

Time	Pulse	Suhu	Kelembaban	Tekanan	Data GPS
03/08/2025 18:15	0	0°C	0%	0hPa	0.000000,0.000000
03/08/2025 18:15	0	29°C	81%	986hPa	,
03/08/2025 18:15	0	29°C	80%	986hPa	,
03/08/2025 18:15	0	29°C	79%	986hPa	,
03/08/2025 18:16	0	29°C	78%	986hPa	-7.060850,110.441190
03/08/2025 18:16	0	29°C	77%	986hPa	-7.060850,110.441190
03/08/2025 18:16	0	29°C	77%	986hPa	-7.060841,110.441182
03/08/2025 18:29	0	27°C	75%	986hPa	-7.060804,110.441177
03/08/2025 18:30	1	26°C	77%	986hPa	-7.060804,110.441198
03/08/2025 18:38	2	26°C	86%	986hPa	-7.060827,110.441190

Time	Pulse	Suhu	Kelembaban	Tekanan	Data GPS
03/08/2025 18:39	3	25°C	87%	986hPa	-7.060822,110.441179
03/08/2025 18:51	4	25°C	87%	986hPa	-7.060814,110.441187

Pengujian sensor dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa sensor BME280 dan modul GPS berfungsi dengan baik serta dapat mengirimkan data ke server penyimpanan (Google Spreadsheet) secara periodik setiap 10 detik. Pengujian ini penting untuk memverifikasi akurasi, konsistensi, dan keandalan sensor. Data pengujian diperoleh pada tanggal 3 Agustus 2025 dengan interval pencatatan otomatis yang tersinkronisasi dengan Google Spreadsheet.

Pada tahap awal pengujian, sensor BME280 menghasilkan data tidak valid berupa 0°C, 0%, dan 0 hPa, yang menunjukkan proses inisialisasi pembacaan belum selesai. Setelah beberapa saat, sensor menampilkan data yang stabil dengan suhu rata-rata 29°C, kelembaban berkisar antara 81%–77%, dan tekanan udara konstan pada nilai 986 hPa. Selama periode pengamatan, terjadi penurunan suhu dari 29°C menjadi 25°C, disertai peningkatan kelembaban hingga 87%, sedangkan tekanan udara relatif tidak mengalami fluktuasi. Perubahan parameter tersebut selaras dengan kondisi lingkungan saat pengujian berlangsung.

Modul GPS pada awal pencatatan juga menghasilkan data tidak valid dengan koordinat 0.000000, 0.000000. Namun, setelah proses akuisisi sinyal satelit, modul berhasil menampilkan koordinat valid di sekitar -7.060850, 110.441190. Hasil pencatatan menunjukkan koordinat yang stabil dengan pergeseran kecil dalam skala 0.00001 derajat, yang masih berada dalam batas toleransi akurasi perangkat GPS.

Selain parameter lingkungan, sistem mencatat nilai *pulse* sebagai indikator aktivitas sensor utama. Data menunjukkan bahwa nilai *pulse* meningkat secara bertahap, dimulai dari 1 pada pukul 18:30 hingga mencapai 4 pada pukul 18:51, yang menandakan sensor mampu merekam peristiwa sesuai rancangan sistem.

Pemilihan sensor BME280 dalam sistem ini didasarkan pada kemampuannya mengukur tiga parameter lingkungan sekaligus, yaitu suhu, kelembaban, dan tekanan udara, dengan tingkat presisi yang tinggi serta konsumsi daya yang rendah.

Hal ini menjadikan BME280 sangat sesuai digunakan dalam perangkat IoT yang membutuhkan efisiensi energi. Sementara itu, modul GPS dipilih karena berfungsi untuk memvalidasi lokasi terjadinya peristiwa atau data lingkungan yang terukur. Keberadaan data koordinat geografis memperkuat sistem monitoring, sebab informasi lingkungan dapat dikaitkan langsung dengan lokasi spesifik di lapangan.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sensor BME280 mampu mengukur suhu, kelembaban, dan tekanan udara secara *real-time* dengan konsistensi yang baik, sedangkan modul GPS berfungsi sesuai spesifikasi dalam menentukan posisi geografis setelah akuisisi satelit. Mekanisme pengiriman data setiap 10 detik ke Google Spreadsheet berjalan dengan baik, sehingga kedua sensor dapat dinyatakan bekerja sesuai kebutuhan dan siap digunakan dalam sistem pemantauan berbasis IoT.

5.2.3 Pengujian Lapangan Sensor AS3935

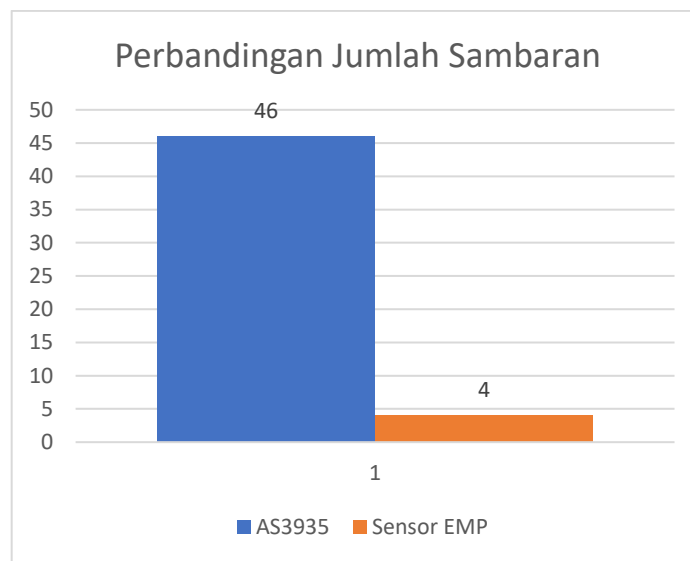
Pengujian estimasi jarak sambaran petir tidak hanya dilakukan menggunakan data lapangan, tetapi juga dibandingkan dengan hasil deteksi sensor AS3935 Lightning Sensor. Sensor ini dirancang khusus untuk mendeteksi aktivitas elektromagnetik akibat kilatan petir dan mampu memperkirakan jarak sambaran berdasarkan analisis pulsa elektromagnetik yang ditangkap. Menurut penelitian, AS3935 memiliki kemampuan untuk mendeteksi sambaran petir dengan jangkauan hingga 40 km dan ketelitian jarak estimasi berkisar $\pm 1-4$ km, sehingga relevan digunakan sebagai alat validasi dalam sistem monitoring petir berbasis mikrokontroler. Oleh karena itu, perbandingan hasil estimasi jarak antara pengujian lapangan dan sensor AS3935 penting untuk menilai tingkat akurasi sistem yang dikembangkan. Hasilnya, sensor AS3935 berhasil mendeteksi beberapa aktivitas petir dengan adanya parameter jarak, sebagaimana disajikan dalam tabel 5- 5 hasil pengujian pada sensor AS335.

Tabel 5- 5 Hasil Pengujian Sensor AS3935

Date	Time	Pulse	Jarak
03/08/2025	18:15:59	1	5Km

Date	Time	Pulse	Jarak
03/08/2025	18:17:13	3	8Km
03/08/2025	18:17:25	5	8Km
03/08/2025	18:23:05	8	4Km
03/08/2025	18:23:15	1	3Km
03/08/2025	18:23:25	3	9Km
03/08/2025	18:23:35	6	9Km
03/08/2025	18:29:21	8	9Km
03/08/2025	18:30:56	1	2Km
03/08/2025	18:36:32	2	1Km
03/08/2025	18:38:23	1	3Km
03/08/2025	18:39:12	2	1Km
03/08/2025	18:39:31	3	3Km
03/08/2025	18:39:46	4	1Km
03/08/2025	18:41:34	5	3Km
03/08/2025	18:45:51	7	4Km
03/08/2025	18:50:07	9	3Km
03/08/2025	18:50:13	13	5Km
03/08/2025	18:50:25	17	7Km
03/08/2025	18:50:37	19	10Km
03/08/2025	18:50:50	23	11Km
03/08/2025	18:51:04	25	10Km
03/08/2025	18:51:16	28	1Km
03/08/2025	18:51:39	29	10Km
03/08/2025	18:51:59	32	10Km
03/08/2025	18:52:14	34	10Km
03/08/2025	18:52:34	36	10Km
03/08/2025	18:52:43	38	10Km
03/08/2025	18:54:43	40	10Km
03/08/2025	18:56:04	2	5Km
03/08/2025	18:56:18	3	6Km
03/08/2025	18:56:24	5	9Km
03/08/2025	18:56:32	7	11Km
03/08/2025	18:56:40	9	13Km
03/08/2025	18:56:57	11	16Km
03/08/2025	18:57:13	13	10Km
03/08/2025	18:57:54	14	10Km
03/08/2025	18:58:08	15	23Km
03/08/2025	18:58:18	17	23Km

Date	Time	Pulse	Jarak
03/08/2025	18:59:10	18	25Km
03/08/2025	18:59:20	20	21Km
03/08/2025	18:59:41	21	20Km
03/08/2025	18:59:54	22	30Km
03/08/2025	19:00:01	23	20Km
03/08/2025	19:00:50	25	7Km
03/08/2025	19:00:57	27	2Km



Gambar 5. 10 Grafik Perbandingan Jumlah Sambaran

Berdasarkan gambar 5.10 grafik perbandingan diatas, sensor AS3935 mencatat sebanyak 46 kali sambaran sedangkan sensor buatan berbasis EMP hanya mencatat 4 kali sambaran.

5.2.4 Frekuensi Deteksi Sensor AS3935 dan Sensor Buatan

Analisis frekuensi deteksi diperlukan untuk memahami karakteristik kerja masing-masing sensor dalam menangkap gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh sambaran petir. Hal ini penting karena setiap sensor memiliki rentang penerimaan frekuensi yang berbeda, sehingga memengaruhi sensitivitas, jarak, dan kecepatan deteksi. Sensor AS3935 dirancang untuk bekerja optimal pada frekuensi sekitar 500 kHz dengan filter pita sempit, sehingga mampu mengurangi

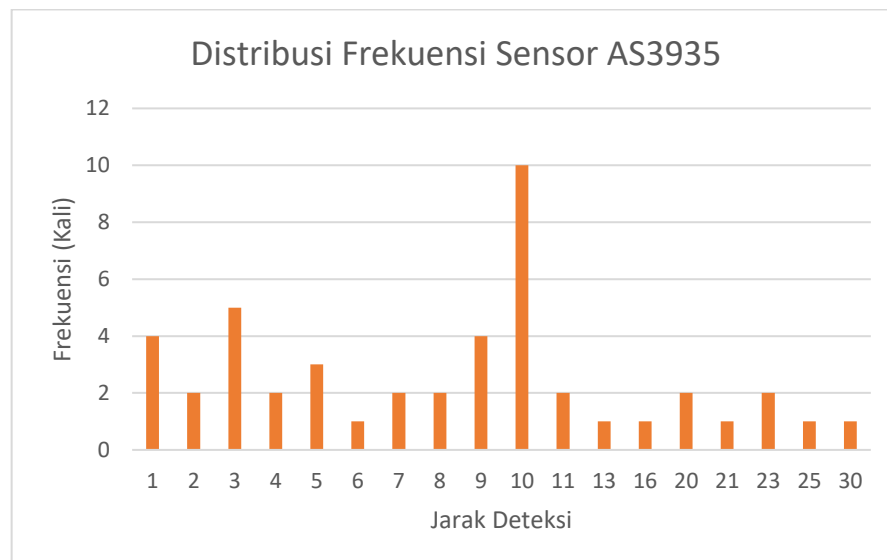
noise dan memberikan estimasi jarak sambaran secara langsung. Sementara itu, sensor buatan berbasis *Electromagnetic Pulse* (EMP) memanfaatkan rangkaian LC untuk menangkap lonjakan sinyal elektromagnetik dengan rentang frekuensi mulai dari 300 kHz hingga 3 MHz, yang mencakup sinyal-sinyal radio frekuensi rendah hingga menengah. Rentang ini memungkinkan sensor EMP mendeteksi berbagai komponen sinyal sambaran, termasuk gelombang awal (*pre-flash*), namun tidak memiliki kemampuan estimasi jarak secara langsung.

Berdasarkan hasil pengujian lapangan, jarak deteksi yang tercatat oleh AS3935 bervariasi antara 1 km hingga 10 km tergantung pada intensitas sambaran. Sensor EMP tidak memberikan estimasi jarak, sehingga perbandingan dilakukan berdasarkan waktu kemunculan sinyal pada kedua sensor terhadap sambaran yang sama. Berikut merupakan table 5- 6 sampel data yang ditampilkan dari hasil distribusi frekuensi jarak deteksi oleh AS3935.

Table 5- 6 Distribusi Frekuensi jarak deteksi oleh sensor AS3935

Jarak (km)	Frekuensi (kali)	Persentase (%)
1	4	8,7
2	2	4,35
3	5	10,87
4	2	4,35
5	3	6,52
6	1	2,17
7	2	4,35
8	2	4,35
9	4	8,7
10	10	21,74
11	2	4,35
13	1	2,17
16	1	2,17
20	2	4,35
21	1	2,17
23	2	4,35
25	1	2,17
30	1	2,17
Total	46	100

Dari hasil tabel diatas dapat dilihat bahwasanya jarak deteksi yang sering terjadi dijarak 10 Km dengan total 10 kali sambaran dan Frekuensi yang dihasilkan sebesar (21,74%), diikuti jarak 3 km (10,87%), 1 km (8,70%), dan 9 km (8,70%). Mayoritas sambaran petir terdeteksi pada jarak menengah, khususnya sekitar 10 km, yang menunjukkan sensitivitas optimal AS3935 pada kisaran tersebut. Deteksi jarak jauh hingga 30 km tetap dimungkinkan, meskipun frekuensinya rendah (2,17%) karena melemahnya intensitas sinyal. Berikut dibawah ini adalah gambar 5.11 grafik dari Distribusi frekuensi jarak deteksi sensor AS3935.



Gambar 5. 11 Grafik Distribusi Frekuensi Sensor AS3935

5.2.5 Analisis Hasil Sensor AS3935 dan Sensor EMP

Analisis hasil sensor AS3935 dan sensor EMP dilakukan untuk membandingkan kinerja kedua sensor dalam mendeteksi gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh sambaran petir. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana sinyal yang diterima oleh sensor buatan memiliki keterkaitan waktu dan kejadian yang sama dengan sinyal yang terdeteksi oleh AS3935, sehingga dapat memberikan gambaran tingkat kesesuaian performa kedua sensor tersebut dalam kondisi lapangan. Berikut ini table 5- 7 hasil dari pencatatan waktu kedua sensor dan table 5- 8 hasil deteksi kedua sensor.

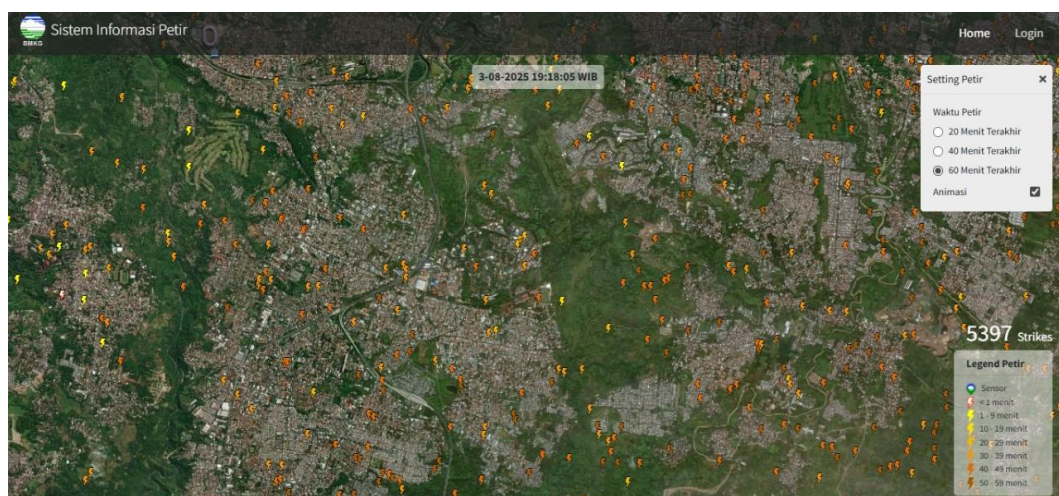
Table 5- 7 Hasil Pencatatan Waktu Kedua Sensor

Date	Sensor AS3935	Sensor Buatan	Estimasi Jarak
03/08/2025	18:36:32	18:36:37	1 Km
03/08/2025	18:39:12	18:39:18	1 Km
03/08/2025	18:39:46	18:39:48	1 Km
03/08/2025	18:51:16	18:51:23	1 Km

Table 5- 8 Hasil Deteksi Kedua Sensor

Jarak (km)	Sensor AS3935	Sensor Buatan
1	4	4
2	2	0
3	5	0
4	2	0
5	3	0
6–30	30	0

Dari data yang diperoleh Adapun bentuk validasi eksternal terhadap pengujian dilapangan, dengan melakukan pembandingan visual data *real-time* terhadap sebaran petir dari informasi BMKG. Hal ini memperkuat validasi bahwa sambaran petir memang terjadi saat pengujian dilapangan secara langsung. Validasi ini dilakukan dengan mengacu pada data BMKG yang memperlihatkan bahwa adanya aktivitas petir disekitar waktu dan lokasi pengujian, data tersebut mendukung keandalan sensor AS3935 sebagai pembandingan.



Gambar 5. 12 Sistem Informasi terjadinya Petir dari Website BMKG

Pada gambar 5.12 di atas merupakan tampilan dari Sistem Informasi Petir yang disediakan oleh website resmi BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika). Sistem ini menyajikan informasi visual mengenai sebaran sambaran petir (*lightning strikes*) yang terpantau secara real-time di wilayah Indonesia, menggunakan peta berbasis satelit. Dalam tampilan tersebut, pengguna dapat melihat waktu kejadian petir, jumlah sambaran, serta lokasi terjadinya petir yang ditandai dengan simbol petir berwarna. Data yang ditampilkan bersumber dari sistem sensor yang dikelola oleh BMKG, dan dapat digunakan untuk *Monitoring* cuaca ekstrem, peringatan dini terhadap potensi bahaya sambaran petir, serta keperluan riset meteorologi dan mitigasi bencana. Sistem ini membantu masyarakat dan instansi terkait untuk memantau kondisi atmosfer secara cepat dan akurat.

5.2.6 Analisis nilai Resonansi LC

Analisis nilai resonansi LC dilakukan untuk mengetahui frekuensi alami rangkaian yang terbentuk dari kombinasi induktor (L) dan kapasitor (C). Perhitungan ini penting agar dapat dipastikan bahwa rangkaian bekerja pada frekuensi yang sesuai dengan sinyal elektromagnetik dari sambaran petir, sehingga sistem mampu mendeteksi dengan lebih akurat. Berikut perhitungan dari resonansi LC dibawah ini:

Perhitungan $L = 1 \text{ mH} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ H}$

$$\begin{aligned}
 1. \quad C &= 1\text{nF} = 1,0 \times 10^{-9} \text{ F} \\
 L &= 1,0 \times 10^{-3} \text{ H} \\
 C &= 1,0 \times 10^{-9} \text{ F} \\
 LC &= (1,0 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-9} \text{ F}) = 1,0 \times 10^{-12} \\
 \sqrt{LC} &= \sqrt{1,0 \times 10^{-12}} = 1,000000000 \times 10^{-6} = 1,0 \times 10^{-6} \\
 2\pi\sqrt{LC} &= 2\pi \times 1,0 \times 10^{-6} = 6,28 \times 10^{-6} \\
 f_0 &= \frac{1}{6,28 \times 10^{-6}} = 159,1549 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

$$2. \quad C = 10 \text{ pF} = 1,0 \times 10^{-11} \text{ F}$$

$$L = 1,0 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 1,0 \times 10^{-11} \text{ F}$$

$$LC = (1,0 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-11} \text{ F}) = 1,0 \times 10^{-14}$$

$$\sqrt{LC} = \sqrt{1,0 \times 10^{-14}} = 1,0000000000 \times 10^{-7} = 1,0 \times 10^{-7}$$

$$2\pi\sqrt{LC} = 2\pi \times 1,0 \times 10^{-7} = 6,28 \times 10^{-7}$$

$$f_0 = \frac{1}{6,28 \times 10^{-7}} = 1,59155 \text{ MHz}$$

$$3. \quad C = 10 \mu\text{F} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ F}$$

$$L = 1,0 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 1,0 \times 10^{-5} \text{ F}$$

$$LC = (1,0 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-5} \text{ F}) = 1,0 \times 10^{-8}$$

$$\sqrt{LC} = \sqrt{1,0 \times 10^{-8}} = 1,0000000000 \times 10^{-4} = 1,0 \times 10^{-4}$$

$$2\pi\sqrt{LC} = 2\pi \times 1,0 \times 10^{-4} = 6,28 \times 10^{-4}$$

$$f_0 = \frac{1}{6,28 \times 10^{-4}} = 1,59155 \text{ kHz}$$

$$4. \quad C = 0,1 \text{ nF} = 100 \text{ pF} = 1,0 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$L = 1,0 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 1,0 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$LC = (1,0 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-10} \text{ F}) = 1,0 \times 10^{-13}$$

$$\sqrt{LC} = \sqrt{1,0 \times 10^{-13}} = 1,0000000000 \times 10^{-6,5} = 1,0 \times 10^{-6,5} = 3,162 \times 10^{-7}$$

$$2\pi\sqrt{LC} = 2\pi \times 3,162 \times 10^{-7} = 1,986 \times 10^{-6}$$

$$f_0 = \frac{1}{1,986 \times 10^{-6}} = 503.292 \text{ kHz}$$

$$\text{Perhitungan } L = 3,3 \text{ mH} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$5. \quad C = 0,1 \text{ nF} = 100 \text{ pF} = 1,0 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$L = 3,3 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$\begin{aligned}
C &= 1,0 \times 10^{-9} \text{ F} \\
LC &= (3,3 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-9} \text{ F}) = 3,3 \times 10^{-12} \\
\sqrt{LC} &= \sqrt{3,3 \times 10^{-12}} = 1.816 \times 10^{-6} \\
2\pi\sqrt{LC} &= 2\pi \times 1.816 \times 10^{-6} = 1.141 \times 10^{-5} \\
f_0 &= \frac{1}{1.141 \times 10^{-5}} = 87.611 \text{ kHz}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
6. \quad C &= 10 \text{ pF} = 1,0 \times 10^{-11} \text{ F} \\
L &= 3,3 \times 10^{-3} \text{ H} \\
C &= 1,0 \times 10^{-11} \text{ F} \\
LC &= (3,3 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-11} \text{ F}) = 3,3 \times 10^{-14} \\
\sqrt{LC} &= \sqrt{3,3 \times 10^{-14}} = 1.816 \times 10^{-7} \\
2\pi\sqrt{LC} &= 2\pi \times 1.816 \times 10^{-7} = 1.141 \times 10^{-6} \\
f_0 &= \frac{1}{1.141 \times 10^{-6}} = 876.11 \text{ kHz}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
7. \quad C &= 10 \text{ } \mu\text{F} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ F} \\
L &= 3,3 \times 10^{-3} \text{ H} \\
C &= 1,0 \times 10^{-5} \text{ F} \\
LC &= (3,3 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-5} \text{ F}) = 3,3 \times 10^{-8} \\
\sqrt{LC} &= \sqrt{3,3 \times 10^{-8}} = 1.816 \times 10^{-4} \\
2\pi\sqrt{LC} &= 2\pi \times 1.816 \times 10^{-4} = 0.001141 \\
f_0 &= \frac{1}{0.001141} = 876.11 \text{ Hz}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
8. \quad C &= 10 \text{ nF} = 100 \text{ Pf} = 1,0 \times 10^{-10} \text{ F} \\
L &= 3,3 \times 10^{-3} \text{ H} \\
C &= 1,0 \times 10^{-10} \text{ F} \\
LC &= (3,3 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (1,0 \times 10^{-10} \text{ F}) = 3,3 \times 10^{-13} \\
\sqrt{LC} &= \sqrt{3,3 \times 10^{-13}} = 5.7445 \times 10^{-7} \\
2\pi\sqrt{LC} &= 2\pi \times 5.7445 \times 10^{-7} = 3.6094 \times 10^{-6}
\end{aligned}$$

$$f_0 = \frac{1}{3.6094 \times 10^{-6}} = 277.053 \text{ kHz}$$

Hasil akhir dari perhitungan Resonansi

- $L - 1 \text{ mH}, C - 1 \text{ nF} \rightarrow f_0 \approx 159.1549 \text{ kHz}$
- $L - 1 \text{ mH}, C - 10 \text{ pF} \rightarrow f_0 \approx 159.1549 \text{ kHz}$
- $L - 1 \text{ mH}, C - 10 \mu\text{F} \rightarrow f_0 \approx 159.1549 \text{ kHz}$
- $L - 1 \text{ mH}, C - 0.1 \text{ nF} \rightarrow f_0 \approx 503.292 \text{ kHz}$
- $L - 3,3 \text{ mH}, C - 1 \text{ nF} \rightarrow f_0 \approx 87.611 \text{ kHz}$
- $L - 3,3 \text{ mH}, C - 10 \text{ pF} \rightarrow f_0 \approx 876.11 \text{ kHz}$
- $L - 3,3 \text{ mH}, C - 10 \mu\text{F} \rightarrow f_0 \approx 876.11 \text{ kHz}$
- $L - 3,3 \text{ mH}, C - 0.1 \text{ nF} \rightarrow f_0 \approx 277.053 \text{ kHz}$

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat disimpulkan bahwa nilai frekuensi resonansi sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara induktor (L) dan kapasitor (C). Semakin besar nilai kapasitor atau induktor, maka frekuensi resonansi yang dihasilkan semakin rendah, sedangkan semakin kecil nilai kapasitor atau induktor maka frekuensi resonansi yang terbentuk semakin tinggi. Dari hasil, terlihat bahwa kombinasi $L = 1 \text{ mH}$ dan $C = 0,1 \text{ nF}$ menghasilkan frekuensi resonansi paling tinggi yaitu sekitar 503,29 kHz, sedangkan kombinasi $L = 3,3 \text{ mH}$ dan $C = 1 \text{ nF}$ menghasilkan frekuensi resonansi paling rendah yaitu sekitar 87,61 kHz.

Pengaruhnya terhadap kinerja alat EMP adalah bahwa rangkaian LC akan lebih peka (sensitif) pada sinyal yang berada di sekitar frekuensi resonansinya, sementara sinyal di luar frekuensi tersebut akan lebih teredam. Dengan demikian, pemilihan nilai L dan C yang tepat sangat penting agar frekuensi resonansi LC berada dalam rentang spektrum gelombang elektromagnetik petir (mulai dari ratusan Hz hingga puluhan MHz). Pada penelitian ini, kombinasi yang menghasilkan frekuensi resonansi sekitar ratusan kHz hingga mendekati 1 MHz terbukti paling relevan, karena masih sesuai dengan komponen frekuensi rendah hingga menengah dari impuls elektromagnetik petir. Hal ini membuat alat EMP

dapat mendeteksi sambaran petir dengan lebih akurat dan mengurangi kemungkinan salah deteksi akibat *noise* lingkungan.

Jika dibandingkan dengan rentang frekuensi gelombang elektromagnetik petir yang meliputi *Very Low Frequency* (VLF) sekitar 3–30 kHz, *Low Frequency* (LF) 30–300 kHz, *High Frequency* (HF) 3–30 MHz, hingga *Very High Frequency* (VHF) 30–300 MHz, bahkan dapat mencapai *Ultra High Frequency* (UHF) lebih dari 300 MHz, maka hasil perhitungan menunjukkan bahwa rangkaian resonansi LC yang dirancang bekerja paling optimal pada rentang LF hingga mendekati HF. Hal ini sesuai dengan karakteristik utama impuls elektromagnetik petir yang banyak memancarkan energi pada frekuensi rendah hingga menengah, sehingga rangkaian ini efektif digunakan untuk mendeteksi sambaran petir dengan tingkat akurasi yang baik sekaligus meminimalkan pengaruh *noise* dari frekuensi di luar rentang tersebut.

5.3 Pengujian *Monitoring*

Pengujian sistem *Monitoring* dilakukan untuk menilai sejauh mana perangkat mampu mengirimkan serta menampilkan data secara *real-time* melalui platform *Internet Of Things* (IoT), dalam hal ini menggunakan Google Spreadsheet sebagai media tampilan data. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa berbagai data yang dihasilkan oleh mikrokontroler ESP32, seperti sinyal deteksi *electromagnetic pulse* (EMP), suhu, kelembaban, tekanan udara, serta koordinat lokasi dari modul GPS, dapat dikirim dan ditampilkan secara akurat pada antarmuka Google Spreadsheet.

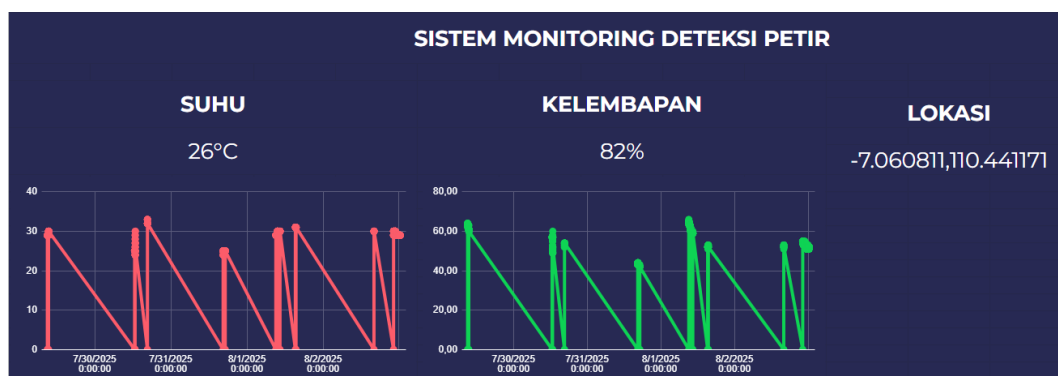
Selama proses pengujian, perangkat dioperasikan di area terbuka dan setiap parameter yang terhubung diamati untuk memastikan tampil dengan benar pada lembar kerja spreadsheet. Stabilitas koneksi jaringan Wi-Fi menjadi faktor penting dalam pengujian ini, karena pengiriman data secara *real-time* sangat bergantung pada kualitas koneksi internet. Jika koneksi terganggu, dapat menyebabkan keterlambatan atau kehilangan data (*data loss*) pada tampilan spreadsheet.

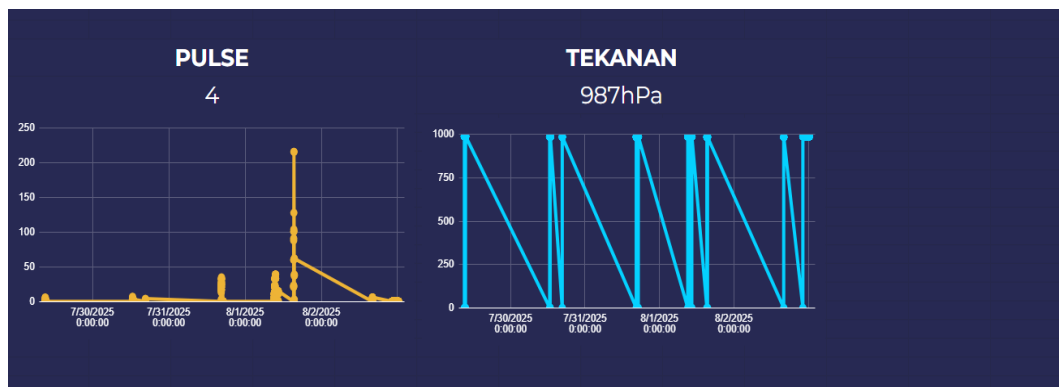
Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data ke Google Spreadsheet secara berkala dengan interval 10 detik. Sensor BME280 yang

digunakan untuk mengukur suhu, kelembaban, dan tekanan udara memberikan data yang konsisten dan diperbarui secara otomatis sesuai interval yang telah diprogram. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Monitoring* berbasis Google Spreadsheet memiliki tingkat keandalan yang baik dalam menampilkan data deteksi petir secara *real-time*.

Fitur pendukung seperti notifikasi buzzer atau indikator LED juga diuji untuk memberikan peringatan secara lokal ketika aktivitas petir terdeteksi. Meskipun Google Spreadsheet tidak menyediakan fitur notifikasi langsung seperti *Blynk*, data yang terekam secara otomatis dapat digunakan sebagai dokumentasi dan analisis historis terhadap kejadian petir.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem deteksi petir yang dirancang mampu menampilkan dan merekam data secara digital melalui Google Spreadsheet dengan baik. Keakuratan data serta respons sistem yang cepat terhadap sinyal EMP dan parameter lingkungan menunjukkan bahwa alat ini efektif untuk digunakan sebagai sistem *Monitoring* petir yang dapat dipantau dari jarak jauh melalui jaringan internet. Berikut dibawah ini gambar 5.13 tampilan *Monitoring* saat melakukan pengujian di lapangan.





Gambar 5. 13 Hasil tampilan *Monitoring* Google Spreadsheet

5.4 Konsumsi Daya dari Sensor *Elektromagnetic Pulse*

Sistem pendeteksi sambaran petir dirancang agar dapat beroperasi secara mandiri dengan menggunakan sumber daya dari dua buah baterai *Lithium-Ion 18650* berkapasitas masing-masing 3,7 V dan 2000 mAh. Kedua baterai ini disusun secara seri untuk menghasilkan tegangan total sebesar 7,4 V. Agar proses pengisian ulang berlangsung aman dan efisien, digunakan modul *Battery Management System* (BMS) TP5100 dengan arus maksimum 2A. Modul ini dilengkapi proteksi terhadap *overcharge*, *overdischarge*, dan arus pendek, sehingga mendukung pengoperasian sistem secara berkelanjutan.

Tegangan keluaran dari modul BMS selanjutnya dimasukkan ke dalam buck converter LM2596, yang berfungsi menurunkan tegangan dari 7,4 V menjadi 5 V. Jalur 5V ini menjadi sumber utama bagi beberapa komponen penting dalam sistem, di antaranya mikrokontroler ESP32 WROOM Devkit V1, LCD 16x2 yang dihubungkan melalui modul I2C, dan buzzer aktif 3,5 V yang berfungsi sebagai alarm lokal saat terjadi deteksi sambaran petir. Sementara itu, komponen yang memerlukan tegangan lebih rendah seperti sensor BME280, modul GPS NEO6MV2, dan sensor buatan berbasis rangkaian *electromagnetic pulse* disuplai langsung melalui pin 3,3 V dari regulator internal ESP32.

Table 5- 9 Estimasi arus dan daya komponen

No	Komponen	Tegangan	Arus	Daya
1	ESP WROOM Devkit V1	5 V	0,120A	0,60W
2	Sensor BME280	3,3 V	0,0004A	0,0023W
3	Modul GPS NEO6MV2	3,3 V	0,037A	0,122W
4	LCD 16 x 2	5 V	0,100A	0,50W
5	Buzzer	5 V	0,025A	0,125W
6	Rangkaian EMP	3,3 V	0,001A	0,003W
	Total		0,283A	1,354W

Dari table 5- 9 akan dilakukan perhitungan konsumsi daya masing-masing komponen dilakukan dengan menggunakan rumus $P=V \times I$ serta di mana nilai arus yang digunakan merupakan estimasi rata-rata berdasarkan datasheet. Untuk memperkirakan durasi operasi sistem, langkah utama adalah menghitung efisiensi dari converter yang digunakan. Dalam sistem ini, digunakan modul step-down LM2596 untuk menurunkan tegangan dari baterai sebesar 7,4 V hasil dari dua baterai 18650 yang disusun secara seri menjadi 5 V yang dibutuhkan oleh ESP32 dan komponen lainnya.

Jika baterai yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 2000 mAh dan disusun secara seri, maka diperlukan perhitungan terlebih dahulu untuk menentukan total energi dalam satuan *watt-hour* (Wh) dengan langkah-langkah sebagai berikut.

$$V_{baterai} = 2 \times 3,7V = 7,4V \quad (5.2)$$

Kapasitas Energi Total:

- E adalah energi (Wh)
- V adalah tegangan (V)
- Q adalah muatan listrik (Ah)

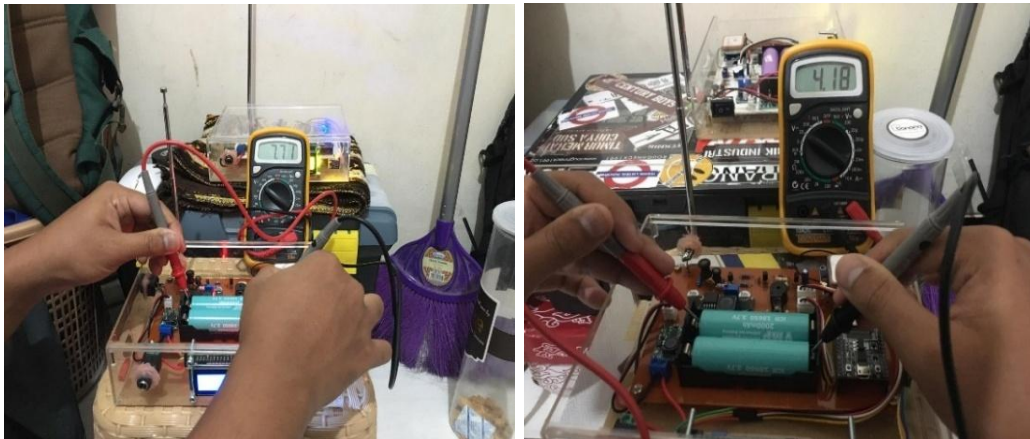
$$E = V \times Q = 7,4V \times 2 Ah = 14,8 Wh \quad (5.3)$$

Dengan dasar perhitungan tersebut, langkah selanjutnya adalah melakukan estimasi daya untuk menentukan sejauh mana sistem dapat beroperasi secara optimal berdasarkan kapasitas baterai yang tersedia serta karakteristik konsumsi energi dari perangkat.

- t = waktu operasi (jam)
- E = energi total yang tersedia (Wh)

$$t = \frac{E}{P_{input}} = \frac{14,8}{1,354 W} = 10,93 h \quad (5.4)$$

Dengan demikian, estimasi durasi operasi sistem diperkirakan mencapai sekitar 10,93 jam atau 10 jam 56 menit. Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi sistem sangat bergantung pada konfigurasi sumber daya dan konsumsi daya dari setiap komponen.



Gambar 5. 14 Pengujian Konsumsi Daya

Pada gambar 5.14 diatas pengujian konsumsi daya secara langsung perangkat mulai dinyalakan di pukul 22:14:56 WIB dengan tegangan awal sebesar 7,71V. Setelah dijalankan secara terus menerus, performa dari perangkat tersebut akhirnya mati total pada pukul 03:20:15 WIB, dan tegangan akhir terukur sebesar 4,18V.

Setelah diketahui total konsumsi daya dari seluruh komponen, selanjutnya dilakukan perhitungan estimasi waktu operasi alat berdasarkan kapasitas sumber daya yang digunakan. Estimasi ini kemudian dibandingkan dengan waktu operasi aktual yang diperoleh selama pengujian. Berikut ini, waktu operasi aktual yang tercatat:

$$t_{\text{aktual}} = 03:20:15 - 22:14:56 = 5,0897 \text{ Jam (5 jam 5 menit)}$$

Jika diasumsikan alat berjalan atau alat di nyalakan sampai baterai terpakai mendekati habis (mengonsumsi hampir seluruh 14,8 Wh), maka:

1. Energi yang dikonsumsi selama pengujian

$$E = P_{\text{total}} \times t \quad (5.5)$$

$$1,354\text{W} \times 5,0897 \text{ Jam} = 6,90 \text{ Wh}$$

Keterangan:

Econs = Energi yang dikonsumsi (satuan Joule atau Watt-jam / Wh)

Ptotal = Total daya yang digunakan (satuan Watt, W)

t = Lama waktu penggunaan (satuan detik atau jam, tergantung satuan daya)

2. Presentase energi baterai yang terpakai

$$\%_{\text{terpakai}} = \frac{E_{\text{cons}}}{E_{\text{batt}}} \times 100\% \quad (5.6)$$

$$\%_{\text{terpakai}} = \frac{6,90}{14,8} \times 100\% = 46,62 \%$$

3. Energi tersisa pada baterai (teoritis)

$$E_{cons} = E_{batt} - E_{cons} = \quad (5.7)$$

$$E_{cons} = 14,8 \text{ Wh} - 6,90 = 7,90 \text{ Wh}$$

4. Sisa kapasitas pada baterai

$$Q_{sisa} = \frac{E_{sisa}}{V_{batt}} \quad (5.8)$$

$$Q_{sisa} = \frac{7,90}{7,4} = 1,068 \text{ Ah} = 1068 \text{ mAh}$$

5. Rata rata arus yang terpakai

$$I_{batt} = \frac{P_{total}}{V_{batt}} = \quad (5.9)$$

$$Q_{sisa} = \frac{1,354}{7,4} = 0,183 \text{ A} = 183 \text{ mA}$$

Hal ini menunjukkan bahwa tegangan masih cukup, namun arus yang tersisa tidak lagi memadai untuk menyuplai seluruh sistem, atau beberapa modul (seperti Wi-Fi atau GPS) telah berhenti bekerja karena batas minimum operasionalnya tidak tercapai. Secara keseluruhan, waktu operasi sistem terdeteksi berkisar kurang lebih 5 jam 5 menit, dengan sumber daya utama dari dua baterai 18650 sebesar 2000mAh. Pengujian ini membuktikan bahwa sistem memiliki ketahanan daya yang cukup baik untuk operasional jangka pendek, namun optimalisasi daya dan manajemen konsumsi energi masih perlu ditingkatkan, terutama untuk kebutuhan *Monitoring* jangka panjang atau penggunaan di lapangan.