

Pengembangan Alat Deteksi Zona Sambar Petir Berbasis Multisensor Menggunakan Metode *Rolling Sphere*

Adi Nugraha¹, Romi Wiryadinata², Felycia³, Muhammad Ilham Daifullah⁴

^{1,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Kota Cilegon, 42435, Indonesia

Corresponding Author: adi.n@untirta.ac.id

Riwayat Artikel

Diserahkan: 3 November 2025

Direvisi: 28 November 2025

Diterima: 28 November 2025

Dipublikasi: 30 November 2025

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat deteksi zona sambaran petir berbasis multisensor sebagai sistem peringatan dini yang mampu mengidentifikasi tingkat risiko sambaran petir pada area terbuka secara real-time. Pengembangan ini secara khusus berfokus pada penerapan metode Rolling Sphere untuk menentukan batas zona aman dan berbahaya berdasarkan analisis ruang terbuka. Nilai radius bola yang digunakan pada metode tersebut diolah menjadi parameter perhitungan zona risiko, kemudian diterjemahkan ke dalam sistem mikrokontroler yang terintegrasi dengan multisensor untuk memantau posisi serta pergerakan pengguna. Hasil pemetaan zona ditampilkan dalam bentuk visualisasi elips yang menggambarkan probabilitas sambaran petir sebesar 50% pada area aman. Sistem memberikan notifikasi otomatis melalui smartphone ketika pengguna memasuki zona berbahaya (zona merah), sehingga mendorong tindakan mitigasi yang cepat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu mendeteksi perubahan posisi pengguna dan memetakan zona risiko dengan akurasi tinggi. Dengan demikian, prototipe ini berpotensi menjadi perangkat keselamatan yang efektif untuk mengurangi risiko cedera akibat sambaran petir pada area terbuka.

Kata kunci: sambaran petir, multisensor, rolling sphere, GPS, peringatan dini.

Abstract

This study aims to develop a multisensor-based lightning strike zone detection device as an early warning system capable of identifying the risk level of lightning strikes in open areas in real time. The development specifically focuses on applying the Rolling Sphere Method to determine the boundaries between safe and hazardous zones based on open-space analysis. The sphere radius used in this method is processed into risk-zone calculation parameters, which are then implemented in a microcontroller system integrated with multisensors to monitor the user's position and movement. The resulting zone mapping is visualized in the form of an ellipse illustrating a 50% lightning-strike probability within the safe area. The system provides automatic notifications through a smartphone when the user enters a hazardous zone (red zone), prompting immediate mitigation actions. Experimental results show that the device can accurately detect user movement and map risk zones with high precision. Thus, the proposed prototype has strong potential as an effective safety tool for reducing the risk of lightning-related injuries in open environments.

Keywords: lightning strike, multisensor, rolling sphere, GPS, early warning.

1. Pendahuluan

Peristiwa sambaran petir pada manusia sering terjadi saat ini, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia [1]–[3]. Kondisi ini dipengaruhi oleh meningkatnya intensitas cuaca ekstrem akibat perubahan iklim global yang memicu hujan badai disertai petir. Sambaran petir sering kali menimpa orang-orang yang beraktivitas di luar ruangan, seperti petani di sawah, nelayan di laut, atau pekerja di area terbuka, karena mereka tidak memiliki perlindungan yang memadai [4]–[6]. Seperti dikutip pada media online kompas.com yang mengabarkan bahwa terjadi sambaran petir pada 4 orang petani dan 1 orang nyawanya tidak terselamatkan. Kejadian tersebut terjadi ketika korban berteduh di gubuk saat cuaca buruk terjadi, disertai hujan angin kencang dan sambaran petir yang berkali-kali. Mereka berada di sawah setelah mencangkul ladang pertanian dan tidak bisa pulang akibat hujan deras [7].

Fenomena petir yang sering mengakibatkan korban jiwa merupakan isu serius yang membutuhkan perhatian khusus. Sambaran petir tidak hanya terjadi secara tiba-tiba, tetapi juga memiliki potensi mematikan, terutama di area terbuka atau lokasi tanpa perlindungan yang memadai [8]. Tingginya intensitas petir di Indonesia, yang dipengaruhi oleh iklim tropis dan curah hujan yang tinggi, semakin memperbesar risiko ini. Petir itu sendiri merupakan peristiwa pelepasan muatan yang terjadi antara awan, dalam awan atau antara awan dengan tanah [9].

Beberapa kasus sambaran petir pada manusia terjadi karena kurangnya pemahaman tentang area di mana petir kemungkinan besar dapat menyambar [10], [11]. Banyak orang tidak menyadari bahwa area terbuka, seperti lapangan, persawahan, atau perairan, adalah lokasi berisiko tinggi saat terjadi hujan badai [12]. Selain itu, kebiasaan berlindung di bawah pohon atau menggunakan benda logam juga meningkatkan kemungkinan tersambar petir

[13], [14]. Tanpa informasi atau peringatan yang jelas mengenai zona bahaya, banyak orang secara tidak sengaja memasuki wilayah yang rentan terhadap sambaran petir (zona merah). Kondisi ini menekankan pentingnya pemetaan zona rawan petir, serta pengembangan teknologi pendekripsi dini untuk meningkatkan keselamatan dan mengurangi risiko korban jiwa akibat fenomena alam ini.

Dalam penelitian ini, peneliti hendak mengembangkan sebuah alat yang telah dibuat sebelumnya dan dapat memberikan peringatan kepada siapa saja yang sedang berada ataupun melewati area zona merah sambaran petir secara langsung. Tidak semua area memiliki zona merah. Sehingga dengan alat yang dibuat oleh peneliti, orang yang berada di area tersebut dapat diperingkatkan agar segera menjauhi area ketika memasuki zona merah sambaran petir secara langsung. Pengembangan alat ini menggunakan multi sensor sehingga dapat memberikan beberapa fitur untuk dapat memberikan peringatan dini terhadap ancaman sambaran petir, terutama ketika seseorang memasuki zona merah. Alat ini juga dikembangkan agar dapat terintegrasi dengan *smartphone* atau perangkat *portable* lainnya. Oleh karenanya ketika pejalan kaki berada di zona merah sambaran petir, maka, *smartphone* pengguna akan menerima notifikasi peringatan agar segera menjauhi area tersebut dan menuju zona hijau di area sekitar.

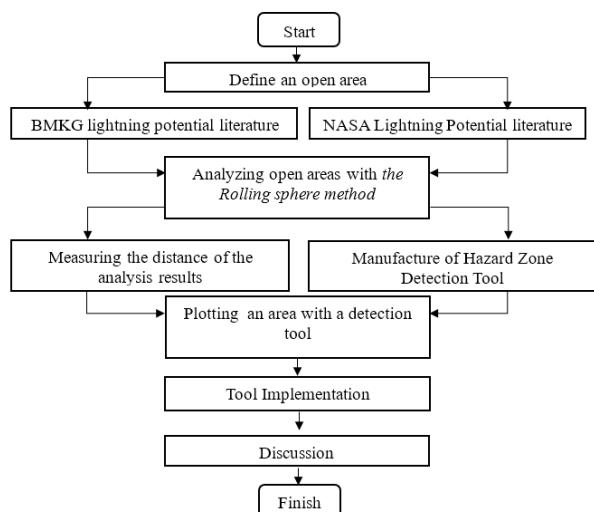
2. Metode

2.1. Tahapan Penelitian

Adapun Tahapan Dalam Pengembangan Alat Deteksi Zona Sambaran Petir Berbasis Multisensor ditunjukan oleh Gambar 1.

Proses penelitian dimulai dengan menentukan terlebih dahulu area terbuka yang akan dianalisis sebagai lokasi pemetaan potensi sambaran petir. Setelah area ditetapkan, peneliti mengumpulkan dan mempelajari literatur potensi petir dari

BMKG serta literatur potensi petir dari NASA sebagai dasar referensi saintifik untuk memahami karakteristik sambaran petir dan parameter yang memengaruhi tingkat risikonya.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Informasi dari kedua sumber tersebut kemudian digunakan dalam tahap analisis area terbuka menggunakan metode Rolling Sphere. Pada tahap ini, perhitungan dilakukan untuk menentukan batas aman dan berbahaya terhadap sambaran petir berdasarkan radius bola perlindungan yang relevan.

Hasil perhitungan ini selanjutnya digunakan untuk mengukur jarak dan menentukan ruang analisis yang memetakan zona aman maupun berbahaya di area penelitian. Secara paralel, dilakukan pula proses pembuatan perangkat deteksi zona bahaya, yaitu alat berbasis multisensor yang dirancang untuk mendeteksi posisi pengguna dan memberikan peringatan dini ketika memasuki zona berisiko.

Setelah alat selesai dibuat, tahapan berikutnya adalah memetakan area penelitian menggunakan perangkat deteksi, sehingga zona bahaya dapat divisualisasikan sesuai hasil analisis. Perangkat kemudian diujicobakan dalam tahap implementasi alat di lapangan untuk mengevaluasi fungsionalitas dan akurasinya.

Hasil pengujian dan implementasi selanjutnya dibahas pada tahap diskusi, yang meliputi interpretasi data, evaluasi kinerja alat, serta relevansi hasil dengan literatur. Seluruh rangkaian proses penelitian ini diakhiri pada tahap finish, yang menandai selesainya kegiatan penelitian.

2.2. Analisis Ruang Terbuka

Penelitian ini dilakukan di Fakultas Teknik (FT) Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA) yang dilaksanakan pada 01 Agustus hingga 30 Oktober 2025. Untuk menganalisis ruang terbuka FT maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode *Rolling sphere*. Metode ini memerlukan beberapa data diantaranya adalah tinggi gedung yang dekat dengan area yang akan diteliti. Setiap gedung yang dekat dengan area yang dianalisis dijadikan sebagai objek hitung dan berpengaruh terhadap area bahaya maupun area aman sambaran petir secara langsung.

Oleh karena Indonesia termasuk dalam kawasan tropis dilihat dari letak geografis 6° LU (Lintang Utara) - 11° LS (Lintang Selatan) dan antara 95° BT (Bujur Timur) - 141° BT (Bujur Timur). Sehingga Indonesia memiliki karakteristik petir tersendiri sesuai dengan hasil penelitian Prof. Reynaldo Zoro dalam [15]. Adapun karakteristik petir ditunjukkan oleh tabel 1.

Tabel 1 menyajikan perbandingan karakteristik sambaran petir berdasarkan polaritas negatif dan polaritas positif, yang masing-masing memiliki ciri fisik dan intensitas berbeda. Data yang ditampilkan mencakup arus puncak sambaran (peak current), kecuraman arus (rate of rise), serta kerapatan sambaran petir pada suatu wilayah.

Tabel 1. Karakteristik petir di Indonesia

Karakteristik Petir		Polaritas Negatif	Polaritas Positif
Arus puncak (i)	Maksimum	280 kA	298 kA
	Jawa Barat	335 kA	392 kA
	Probability 50%	40 kA	18 kA
	Rata-rata	41 kA	30 kA
Kecuraman (di/dt)	Maksimum	119 kA/ μ s	120 kA/ μ s
	Probability 50%	30 kA/ μ s	20 kA/ μ s
Kerapatan Sambaran (Sambaran/km ² /tahun)		4,1 – 12,4	1,5 – 3,8
Kerapatan Sambaran Total (Sambaran/km ² /tahun)		7,9 – 15,5	

Pada bagian arus puncak (i), nilai maksimum untuk petir berpolaritas negatif tercatat mencapai 280 kA di wilayah Tangkuban Perahu dan 335 kA di wilayah Jawa Barat. Untuk petir berpolaritas positif, nilai maksimumnya bahkan lebih tinggi, yakni 298 kA di Tangkuban Perahu dan 392 kA di Jawa Barat. Hal ini menunjukkan bahwa sambaran petir positif cenderung memiliki arus puncak yang lebih besar dibandingkan sambaran negatif, sehingga memiliki potensi kerusakan yang lebih signifikan.

Selain nilai maksimum, tabel juga menampilkan arus puncak pada probabilitas 50%, yaitu nilai yang mewakili kondisi sambaran yang lebih umum terjadi. Untuk polaritas negatif, arus sambaran 50% berada pada 40 kA, sedangkan untuk polaritas positif sebesar 18 kA. Sementara itu, nilai arus rata-rata sambaran negatif berada di angka 41 kA, sedangkan sambaran positif memiliki rata-rata 30 kA.

Pada parameter kecuraman arus (di/dt), yang menggambarkan kecepatan kenaikan arus dalam mikrodetik, sambaran negatif dan positif memiliki nilai maksimum yang relatif mirip, yaitu 119 kA/ μ s untuk negatif dan 120 kA/ μ s untuk positif. Namun, pada probabilitas 50%, kecuraman sambaran negatif (30 kA/ μ s) lebih tinggi dibandingkan sambaran positif (20

kA/ μ s), mengindikasikan bahwa naiknya arus pada petir negatif umumnya terjadi lebih cepat.

Tabel 1 juga mencantumkan kerapatan sambaran petir (flash density), yaitu jumlah sambaran per kilometer persegi per tahun. Untuk polaritas negatif, nilai kerapatan sambaran berada pada kisaran 4,1 – 12,4 sambaran/km²/tahun, sedangkan untuk polaritas positif berkisar antara 1,5 – 3,8 sambaran/km²/tahun. Jika total sambaran petir diakumulasikan dari seluruh polaritas, kerapatan sambaran total mencapai 7,9 – 15,5 sambaran/km²/tahun.

Sedangkan penentuan jarak sambar tersebut dirumuskan oleh dua formmula yang ditunjukkan oleh tabel 2.

Tabel 2. Formula jarak sambar

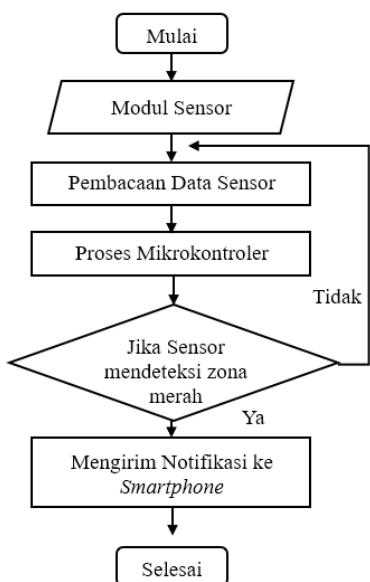
Jarak sambar (m)	
Amstrong & Whitehead	$r_s = 6,7 \cdot I^{0,8}$
IEC 62305/2010	$r_s = 10 \cdot I^{0,65}$

Data inilah yang menjadi acuan dalam perhitungan analisa untuk menentukan area atau zona bahaya dari sambaran petir secara langsung. Dengan data-data tersebut dapat dipetakan kedalam bentuk titik area yang termasuk dalam zona bahaya sambaran petir langsung.

2.3. Perancangan Alat Deteksi Zona Bahaya Petir

Adapun perancangan Alat Deteksi zona bahaya petir ditunjukan oleh diagram alir Gambar 2. Perancangan alat dilakukan setelah mendapatkan hasil analisis area terbuka pada gedung FT menggunakan metode Rolling sphere. Data tersebut kemudian diukur dengan alat ukur dan dilakukan plotting secara manual. Sehingga didapatkan titik-titik zona bahaya sambaran petir langsung. Data tersebut kemudian dicatat dan disimpan untuk integrasi data pada mikrokontorler. Perancangan alat deteksi sambaran petir langsung dilakukan dengan menggabungkan beberapa komponen

elektronika dengan sensor GPS NEO6MV2 untuk membaca hasil dari pengukuran sebelumnya.



Gambar 2. Diagram Alir perancangan alat deteksi zona bahaya petir

Data yang dibaca oleh sensor kemudian dilakukan proses pada mikrokontroler dan jika sensor membaca hasil plotting sebelumnya. Area hasil plotting tersebut diinisiasi kedalam bentuk program sehingga ketika sensor membaca kategori zona bahaya sambaran petir langsung, maka alat akan mengirimkan notifikasi berupa pesan peringatan ke smartphone berupa anjuran untuk segera meninggalkan area tersebut. jika sensor tidak membaca hasil plotting sebelumnya maka alat tidak akan mengirimkan peringatan apapun.

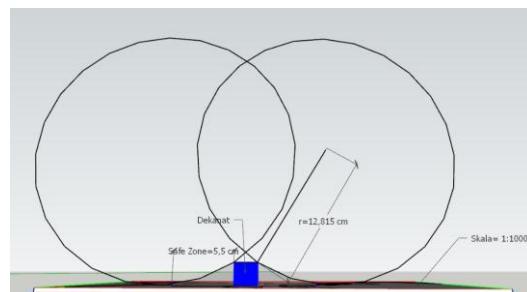
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Menentukan Zona Merah Sambaran Petir

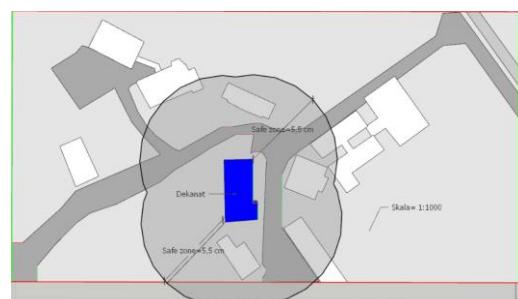
Proses yang pertama kali dilakukan pada penelitian ini adalah memilih sampel gedung untuk dijadikan sebagai titik area sambar petir secara langsung. Sampel gedung yang dipilih untuk penelitian ini adalah gedung dekanat FT Untirta. Salah satu alasannya adalah karena diantara gedung FT salah satu gedung yang memiliki potensi tersambar petir paling tinggi

adalah gedung dekanat FT. hal ini dikarenakan gedung dekanat memiliki ketinggian yang paling tinggi diantara gedung lainnya. Jika dikonversikan ke ukuran sebenarnya dengan skala 1: 1000, maka dimensi tersebut setara dengan panjang sekitar 38,2 meter, lebar 21,3 meter, dan tinggi 20 meter, sehingga jarak antara gedung FT dengan awan petir yang melintar ke area tersebut lebih besar.

Dalam pembuatan sketsa gedung FT dilakukan sketsa sederhana dengan ukuran yang sebenarnya sehingga gambar memiliki acuan skala. Dengan adanya skala ini, maka desain atau sketsa area gedung FT dapat dihitung dengan berbagai ukuran. Dengan adanya skala inilah yang kemudian akan memudahkan perhitungan area sambar petir dengan metode rolling sphere. Adapun sketsa gedung tersebut ditunjukkan oleh Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Sketsa Zona sambaran petir tampak samping



Gambar 4. Sketsa Zona sambaran petir tampak atas

Dalam sistem deteksi zona sambaran petir yang dirancang, area perlindungan terhadap sambaran petir direpresentasikan secara visual dalam bentuk garis elips. Garis elips tersebut menggambarkan batas antara zona aman dan zona berbahaya dari sambaran petir berdasarkan hasil perhitungan probabilistik. Pada penelitian ini, area yang berada di dalam garis elips

dianggap sebagai area aman, di mana probabilitas terkena sambaran petir secara langsung berada pada kisaran 50% atau lebih rendah. Sebaliknya, area yang berada di luar garis elips dikategorikan sebagai zona bahaya, yaitu wilayah yang memiliki kemungkinan lebih tinggi untuk menerima sambaran petir langsung ketika terjadi badai atau aktivitas awan petir di sekitar lokasi tersebut.

Dalam gambar 4, garis elips pada gambar yang menggambarkan batas area aman merupakan acuan utama bagi alat deteksi yang dirancang. Alat akan membaca dan menginterpretasikan posisi relatif pengguna terhadap garis elips tersebut. Dengan menggunakan sensor GPS, alat akan menentukan koordinat posisi pengguna berdasarkan nilai longitud dan latitude, kemudian membandingkan posisi tersebut dengan batas elips yang telah dihitung sebelumnya menggunakan metode tertentu — misalnya metode rolling sphere atau analisis probabilitas medan listrik.

Ketika hasil pembacaan menunjukkan bahwa pengguna masih berada di dalam area elips (zona aman), alat tidak akan memberikan peringatan bahaya. Sebaliknya, apabila posisi pengguna terdeteksi melewati garis elips dan masuk ke area di luar batas tersebut, sistem akan memberikan peringatan otomatis. Peringatan ini dapat berupa sinyal suara, indikator visual seperti lampu LED, atau getaran, tergantung pada konfigurasi alat yang digunakan.

3.2. Perancangan Alat

Proses perancangan alat dimulai dengan desain alat dengan menggunakan sketch. Proses ini memerlukan beberapa hari karena untuk menyesuaikan komponen-komponen alat dengan desain yang telah ditentukan sebelumnya. Adapun proses perancangan alat dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 5. Alat deteksi zona sambaran petir

Pada gambar 5, alat yang dirancang terdiri dari dua sensor utama, yaitu sensor GPS (*Global Positioning System*) dan sensor MPU (*Motion Processing Unit*). Kedua sensor ini bekerja secara terintegrasi untuk memperoleh data posisi dan pergerakan alat ketika digunakan di lapangan. Sensor GPS berperan sebagai pendekripsi posisi geografis, sedangkan sensor MPU digunakan untuk mendekripsi orientasi, kemiringan, serta dinamika gerak alat ketika berpindah tempat. Integrasi kedua sensor ini memungkinkan sistem untuk bekerja secara real-time dalam memantau posisi dan arah pergerakan pengguna.

Informasi posisi yang diperoleh dari sensor GPS menjadi dasar untuk menentukan apakah alat atau pengguna sedang berada di dalam zona aman atau zona sambaran petir langsung. Data ini kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan zona perlindungan petir yang diperoleh melalui metode rolling sphere. Dengan demikian, alat dapat memberikan peringatan dini apabila pengguna berada terlalu dekat dengan area yang berpotensi terkena sambaran petir. Ketika alat diaktifkan, sensor GPS akan mulai mencari sinyal satelit untuk menentukan koordinat posisi. Setelah posisi berhasil diperoleh, data tersebut akan dikirim ke sistem pengolah utama untuk dianalisis bersama hasil perhitungan zona sambaran petir dari metode rolling sphere. Secara bersamaan, sensor MPU memantau orientasi dan pergerakan alat,

memastikan data posisi tetap akurat meskipun pengguna berpindah lokasi.

Jika posisi pengguna diketahui berada di area aman, sistem tidak akan memberikan peringatan. Namun, apabila koordinat yang dibaca GPS menunjukkan bahwa pengguna berada di dalam atau dekat dengan zona sambaran petir langsung, alat secara otomatis akan mengeluarkan tanda bahaya agar pengguna segera menjauh. Dengan cara ini, pengguna dapat menghindari risiko sambaran petir secara langsung.

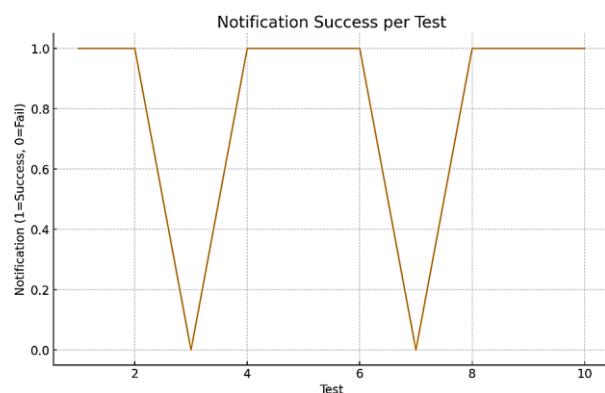
3.3. Uji Coba alat

Alat masih berada pada tahap perancangan dan uji coba terbatas, data kinerja yang diperoleh bersifat awal dan digunakan sebagai dasar untuk penyempurnaan desain. Uji coba dilakukan pada 10 skenario pengujian awal, di mana pengguna diarahkan untuk memasuki zona merah yang telah ditentukan berdasarkan perhitungan metode Rolling Sphere.

Dari hasil uji coba terbatas tersebut, notifikasi peringatan berhasil muncul pada 8 skenario, sehingga tingkat keberhasilan deteksi awal tercatat sekitar 80%. Meskipun belum optimal, hasil ini menunjukkan bahwa sistem sudah mampu melakukan deteksi dasar terhadap perubahan posisi pengguna.

Pengujian terhadap akurasi GPS menunjukkan bahwa prototipe masih memiliki error posisi sekitar 4 hingga 7 meter, yang wajar untuk pengujian awal dan dapat ditingkatkan pada tahap pengembangan berikutnya dengan optimasi sensor atau penggunaan metode koreksi posisi.

Waktu tunda notifikasi (delay) tercatat berada pada kisaran 2 hingga 4 detik, tergantung kekuatan sinyal dan pemrosesan mikrokontroler. Nilai ini masih dapat diterima untuk tahap awal, namun perlu diminimalkan pada versi berikutnya agar respons peringatan lebih cepat.



Gambar 6. Grafik uji coba terbatas alat

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji prototipe awal alat deteksi zona sambaran petir berbasis multisensor yang dirancang untuk memberikan peringatan dini ketika pengguna memasuki area berisiko tinggi. Berdasarkan uji coba terbatas yang dilakukan pada sepuluh skenario pengujian, prototipe menunjukkan kemampuan deteksi awal dengan tingkat keberhasilan notifikasi mencapai 80%, yaitu delapan dari sepuluh percobaan berhasil memberikan peringatan ketika pengguna memasuki zona merah.

Hasil uji coba menunjukkan bahwa akurasi posisi GPS pada prototipe masih berada pada kisaran 4 hingga 7 meter, yang masih dapat diterima pada tahap perancangan awal namun memerlukan peningkatan pada tahap pengembangan berikutnya. Sistem notifikasi juga memiliki waktu tunda antara 2 hingga 4 detik, yang menunjukkan bahwa mekanisme pengiriman peringatan sudah berfungsi tetapi masih perlu dioptimalkan untuk meningkatkan responsivitas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA) atas segala dukungan, fasilitas, pendanaan, serta bimbingan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan paper ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan

kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) UNTIRTA yang telah memberikan arahan, pendampingan, serta kesempatan bagi penulis untuk melaksanakan penelitian ini dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] A. Dewan and M. A. Bhuiyan, "Spatial Pattern and Land Surface Features Associated with Cloud-to-Ground Lightning in Bangladesh: An Exploratory Study," *Environ. Earth Sci.*, 2022.
- [2] B. B. S. D. A. Harsono, A. S. Surya, K. G. H. Mangunkusumo, and A. P. Purnomoadi, "Karakteristik Petir Indonesia Dan Penggunaannya Dalam Evaluasi Unjuk Kerja Saluran Udara 150 Kv Saat Terjadi Sambaran Petir," *J. Technopreneur*, vol. 9, no. 1, pp. 46–53, 2021, doi: 10.30869/jtech.v9i1.726.
- [3] A. Nugraha, "Design of Lightning Strike Hazard Zone Detection System for Early Warning," *Fidelity*, 2024.
- [4] T. Mazumder and M. M. Saroar, "Lightning-induced vulnerability assessment in Bangladesh using machine learning and GIS-based approach," *Prog. Disaster Sci.*, vol. 25, p. 100406, 2025, doi: 10.1016/j.pdisas.2025.100406.
- [5] E. Susanto, M. R. N. Wahyuddin, A. R. Setyahagi, and R. Hidayat, "Analisis Spasial dan Temporal Tingkat Ancaman Sambaran Petir CG di Wilayah Provinsi Sulawesi Selatan," *Pros. Semin. Nas. Fis. PPs UNM*, vol. 2, pp. 96–99, 2020.
- [6] C. Gomes, "Defining lightning-safe structures for all socio-economic communities," *Defin. Light. safe Struct.*, vol. 118, no. 9, pp. 1–8, 2022, doi: 10.17159/sajs.2022/10451.
- [7] I. Nugraha and F. Assifa, "4 Pria Tasikmalaya Tersambar Petir, 1 Tewas akibat Luka Bakar di Dada," *kompas.com*, 2024.
- [8] H. G. P. Hunt, R. Blumenthal, K. J. Nixon, and C. Gomes, "A multidisciplinary forensic analysis of two lightning deaths observed in South Africa," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 51, 2020, doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101814.
- [9] A. Nugraha and R. Zoro, "Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tegangan Rendah Dan Peralatan Elektronik Di Gardu Induk Tegangan Tinggi," Institut Teknologi Bandung, 2021.
- [10] J. D. Jensen, J. Thurman, and A. L. Vincent, *Lightning Injuries*. Treasure Island: StatPearls Publishing, 2024.
- [11] R. L. Holle and M. A. Cooper, "Human Vulnerability to Lightning Strikes: The Role of Risk Awareness and High-Risk Areas," *J. Atmos. Hazards*, vol. 5, no. 2, pp. 89–104, 2021.
- [12] A. Nugraha, "Design of Lightning Strike Danger Zone Detection System Using the Rolling Sphere Method Integrated with Smartphones," in *2024 International Conference on Informatics Electrical and Electronics (ICIEE)*, 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIEE63403.2024.10920388.
- [13] M. Mitolo, E. Pons, and G. Zizzo, "Protection of Trees Against Lightning Strikes as a Measure to Prevent Fires and Loss of Human Life," in *ICPS 2021*, 2021.
- [14] C. Gomes and Z. M. Khurshid, "Do metal objects such as mobile phones increase lightning risk?," *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 12, no. 1, pp. 1819–1836, 2021, doi: 10.1080/19475705.2021.1946172.
- [15] R. Zoro and W. Arismunandar, *Sistem Proteksi Petir*. 2018.