

Analisis Spasiotemporal Kerapatan Sambaran Petir Jenis *Cloud To Ground* Berdasarkan Ketinggian dan Kepadatan Bangunan di Kota Kupang Tahun 2023-2025

Juventus Retang Hamba Mangili^{1, a} Abdul Wahid^{1, b} Philips Bramantia Mudamakin^{2, c}
Albert Zicko Johannes^{1, d}

¹ Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jalan Adi Sucipto Penfui, Kota Kupang 85001, Indonesia

² Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kupang
Jalan R.W. Monginsidi, Pasir Panjang, Kota Kupang 85227, Indonesia

e-mail: ^{a*} juventusofficial18@gmail.com, ^b abdul.wahid@staf.undana.ac.id, ^c philips.mudamakin@bmkg.go.id
dan ^d zickojohannes@staf.undana.ac.id

Diajukan: 28 Juli 2026; Diterima: 5 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Telah dilakukan penelitian yang menganalisis pola spasiotemporal kerapatan sambaran petir Cloud to Ground (CG) berdasarkan faktor ketinggian dan kepadatan bangunan di Kota Kupang tahun 2023-2025. Data petir diperoleh dari Lightning Detector BMKG Stasiun Geofisika Kupang. Sebanyak 92.884 sambaran petir CG terekam selama periode tiga tahun dan dianalisis spasial menggunakan ArcGIS 10.8 dengan interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW). Untuk kepadatan bangunan, dikembangkan formula indeks tarikan petir untuk mengatasi bias luas wilayah pada analisis konvensional. Hasil menunjukkan bahwa kerapatan petir tidak berbanding lurus dengan ketinggian; kerapatan tertinggi (hingga 13.782 sambaran/km² pada tahun 2024) terjadi pada elevasi sangat rendah (<10 mdpl) di wilayah pesisir. Sebaliknya, terdapat hubungan hierarkis positif yang kuat antara kepadatan bangunan dan kerapatan petir, di mana wilayah dengan kepadatan sangat tinggi (pusat kota) secara konsisten memiliki kerapatan petir tertinggi (386,7 sambaran/km² pada tahun 2024). Formula indeks tarikan petir yang dikembangkan menunjukkan kinerja lebih representatif dibandingkan pendekatan konvensional dalam mengungkap peran bangunan sebagai atraktor petir. Penelitian ini menghasilkan peta kerawanan petir yang dapat digunakan sebagai acuan mitigasi bahaya petir di wilayah perkotaan pesisir tropis.

Kata kunci: Petir Cloud to Ground; Ketinggian; Kepadatan bangunan; Indeks tarikan petir; SIG

Abstract

Research has been conducted to analyze the spatiotemporal pattern of Cloud-to-Ground (CG) lightning strike density based on elevation and building density in Kupang City for the 2023–2025 period. Lightning data were obtained from the Lightning Detector at the BMKG Kupang Geophysics Station. A total of 92,884 CG lightning strikes were recorded over the three-year period and analyzed spatially using ArcGIS 10.8 with Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation. For building density, a new lightning attraction index formula was developed to address area bias inherent in conventional analysis. The results show that lightning density is not linearly related to elevation; the highest density (up to 13,782 strikes/km² in 2024) occurs at very low elevations (<10 m above sea level) in coastal areas. In contrast, a strong positive hierarchical relationship exists between building density and lightning density, with areas of very high building density (the city center) consistently recording the highest lightning density (386.7 strikes/km² in 2024). The newly developed lightning attraction index formula demonstrates more representative performance than the conventional approach in revealing the role of buildings as lightning attractors. This research produces lightning hazard maps that can serve as a reference for lightning risk mitigation in tropical coastal urban areas.

Keywords: Cloud to Ground lightning; Elevation; Building density; Lightning attraction index; GIS

PENDAHULUAN

Petir adalah manifestasi alami dari muatan listrik dalam atmosfer bumi yang terjadi terutama di awan konvektif, khususnya awan Cumulonimbus (Cb) [1]. Petir disebabkan oleh perbedaan muatan yang signifikan antara awan dan lingkungan sekitarnya. Ketika medan listrik melebihi medan tembus udara, terjadi pelepasan muatan yang disebut

sambaran petir [1]. Sambaran ini membawa arus listrik yang sangat tinggi, mencapai puluhan ribu ampere, dengan suhu puncak lebih dari 50.000°F, jauh lebih panas dari permukaan matahari [2].

Indonesia, yang terletak di wilayah tropis, mencatat rata-rata lebih dari 200 hari guruh per tahun dengan sejumlah besar sambaran petir [3]. Kota Kupang sebagai pusat pemerintahan Provinsi Nusa Tenggara Timur memiliki karakteristik topografi yang unik, terdiri dari wilayah pesisir, dataran rendah dan perbukitan, dengan ketinggian terendah 0-50 mdpl dan tertinggi di bagian selatan mencapai 100-350 mdpl [4]. Dari segi visual dan pemanfaatan lahan, wilayah ini sebagian besar tergolong dataran rendah yang telah digunakan untuk berbagai kegiatan ekonomi [4].

Dua faktor fisik dan antropogenik yang diduga mempengaruhi distribusi sambaran petir adalah ketinggian dan kepadatan bangunan. Secara teoritis, daerah dengan elevasi lebih tinggi seharusnya lebih dekat dengan pusat muatan awan, sehingga berpotensi lebih sering tersambar petir. Namun penelitian sebelumnya di Kota Kupang justru menemukan hal sebaliknya [2], [5]. Sementara itu, wilayah dengan kepadatan bangunan tinggi dan infrastruktur vertikal berpotensi menjadi penarik sambaran petir karena efek medan listrik lokal serta fenomena pulau panas perkotaan [6].

Distribusi kerapatan sambaran petir CG di Kota Kupang menunjukkan dominasi pada wilayah dengan elevasi rendah, khususnya 0-10 mdpl. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan ketinggian tidak selalu berbanding lurus dengan frekuensi petir [5]. Fenomena petir di Kota Kupang dipengaruhi oleh sejumlah faktor meteorologis dan geografis, termasuk posisi strategis di tropis, peningkatan kelembapan selama musim hujan, serta pengaruh angin muson yang membawa uap air dari wilayah sekitarnya [7].

Penelitian sebelumnya tentang petir dan kepadatan bangunan telah dilakukan oleh Susanto (2018) di Makassar yang menemukan korelasi negatif [6]; Taufik dkk. (2022) di Kuala Lumpur yang menunjukkan bahwa struktur tinggi meningkatkan sambaran petir [8]; serta Riqmawatin & Intan (2020) di Pasuruan yang mengidentifikasi daerah kepadatan tinggi sebagai zona rawan petir [9]. Namun, belum ada penelitian serupa di Kota Kupang yang menggunakan NDBI dan Urban Index dari citra satelit.

Penelitian sebelumnya tentang petir di Kota Kupang oleh Narut dkk. (2018) dan Nenik dkk. (2025) [2], [5] masih memiliki beberapa keterbatasan yang menjadi celah penelitian. Studi-studi tersebut hanya menganalisis data hingga tahun 2022 dan belum mencakup periode terkini (2023-2025), sehingga belum menggambarkan pola aktivitas petir terbaru yang mungkin dipengaruhi oleh perubahan iklim dan urbanisasi. Analisis hubungan petir dengan kepadatan bangunan dalam penelitian sebelumnya masih menggunakan pendekatan konvensional ($d = X/A$) yang sangat dipengaruhi oleh bias luas wilayah, kelas dengan luas kecil (misalnya non terbangun) justru menunjukkan kerapatan tinggi secara artifisial, sehingga tidak mencerminkan kondisi aktual di lapangan. Metode konvensional ini belum memadai karena mengabaikan fakta bahwa bangunan memiliki kemampuan tarikan elektrostatik yang berbeda-beda tergantung pada kepadatan dan ketinggian strukturnya. Belum ada penelitian di Kota Kupang yang memanfaatkan indeks NDBI dan Urban Index dari citra satelit untuk memetakan kepadatan bangunan secara objektif dan terukur.

Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan keterbaruan dengan: menggunakan data petir terbaru tahun 2023-2025, memperbarui studi sebelumnya yang terbatas hingga 2022. Mengembangkan formula indeks tarikan petir yang secara eksplisit mengoreksi bias luas wilayah pada analisis kepadatan bangunan. Formula ini merupakan kontribusi orisinal penelitian karena belum pernah dikembangkan sebelumnya di Indonesia, khususnya untuk analisis petir di wilayah perkotaan. Memanfaatkan indeks NDBI dan Urban Index dari citra satelit Landsat 8/9 terkini untuk klasifikasi kepadatan bangunan, yang belum pernah diterapkan sebelumnya di Kota Kupang. Menyediakan peta kerawanan petir berbasis ketinggian dan kepadatan bangunan yang dapat digunakan secara operasional untuk mitigasi bencana.

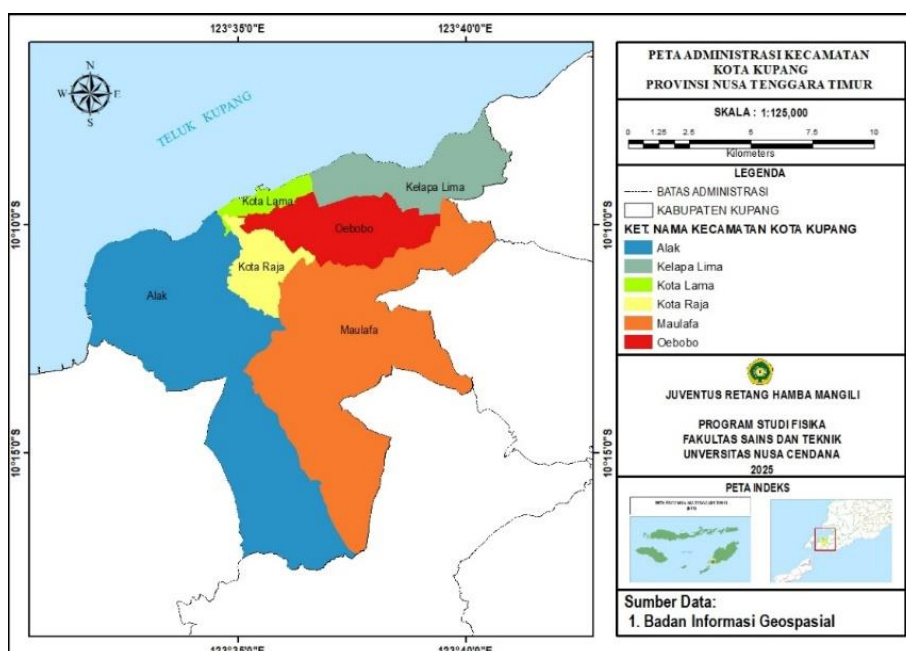
Berdasarkan uraian di atas penelitian ini menganalisis kerapatan sambaran petir CG berdasarkan ketinggian di Kota Kupang tahun 2023-2025, dan menganalisis kerapatan sambaran petir CG berdasarkan kepadatan bangunan menggunakan formula indeks tarikan yang dikembangkan.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kupang, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur dengan objek penelitian yaitu wilayah administrasi Kota Kupang yang meliputi 6 kecamatan (Alak, Maulafa, Oebobo, Kota Raja, Kelapa Lima, dan Kota Lama). Adapun peta lokasi penelitian terdapat pada gambar 1.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sambaran petir jenis Cloud to Ground (CG) dalam kurun waktu tiga tahun yaitu tahun 2023, 2024, dan 2025 yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kupang. Total sambaran petir yang terekam selama periode tiga tahun adalah 92.884 sambaran, dengan rincian 31.175 sambaran (2023), 42.741 sambaran (2024), dan 18.968 sambaran

(2025). Parameter lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah data elevasi Kota Kupang yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan diunduh melalui situs web (<https://tanahair.indonesia.go.id>), serta data kepadatan bangunan yang diperoleh dari citra satelit Landsat 8/9 melalui situs web USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Data petir diolah dengan perangkat lunak Nexstorm Lightning Detector dan Lightning Data Processing kemudian dipetakan dengan ArcGIS 10.8 menggunakan metode interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) dengan parameter power = 2, search radius = 12 titik terdekat, dan jumlah neighbor = 12. Hasil interpolasi diklasifikasikan menggunakan metode Jenks Natural Breaks menjadi lima kelas kerapatan (Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, Sangat Tinggi).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Pengolahan Data Petir

Data petir (.db3) dikonversi ke .csv menggunakan *software* Nexstorm dan *Lightning Data Processing*, kemudian diinterpolasi menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) di ArcGIS 10.8 untuk menghasilkan peta kerapatan petir (sambaran/km²) dengan klasifikasi *Jenks Natural Breaks*.

Analisis Berdasarkan Ketinggian

Analisis kerapatan sambaran petir CG dengan ketinggian/Digital Elevation Model (DEM) dilakukan dengan menyandingkan peta kerapatan sambaran petir dengan peta ketinggian wilayah Kota Kupang serta menganalisis kerapatan untuk setiap kategori ketinggian dengan membuat visualisasi dalam bentuk grafik atau diagram untuk menunjukkan hubungan antara ketinggian dan kejadian petir. Data DEM diklasifikasikan menjadi 5 kelas ketinggian (tabel 1). Kerapatan petir untuk setiap kelas ketinggian dihitung dengan metode konvensional ($d = X/A$), karena hubungan ketinggian dan petir bersifat non-linier.

$$d = \frac{X}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

d = kerapatan petir kelas ke-i (sambaran/km²)

X = total sambaran petir per tahun di seluruh wilayah (sambaran)

A = luas wilayah kelas (km²)

Tabel 1. Klasifikasi Ketinggian Wilayah Kota Kupang

Kategori Ketinggian	Meter (mdpl)
Sangat Rendah	<10 m
Rendah	10-50 m
Sedang	50-100 m
Tinggi	100-200 m
Sangat Tinggi	>200 m

Analisis Berdasarkan Kepadatan Bangunan (Formula Indeks Tarikan)

Analisis kerapatan sambaran petir CG dengan kepadatan bangunan dilakukan dengan mengolah citra satelit Landsat 8/9 menggunakan algoritma *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) dan *Urban Index* (UI). Untuk mengatasi bias luas wilayah pada pendekatan konvensional ($d = X/A$), Untuk mengatasi bias luas wilayah pada pendekatan konvensional, dikembangkan formula indeks tarikan petir:

$$d_i = \frac{X_{total} K_i}{\sum (k_i A_j)} \quad (2)$$

Keterangan:

d_i = kerapatan petir kelas ke-i (sambaran/km²)

X_{total} = total sambaran petir per tahun di seluruh wilayah (sambaran)

k_i = indeks tarikan petir kelas ke-i (1 = non terbangun, 2 = rendah, 3 = sedang, 4 = tinggi, 5 = sangat tinggi)

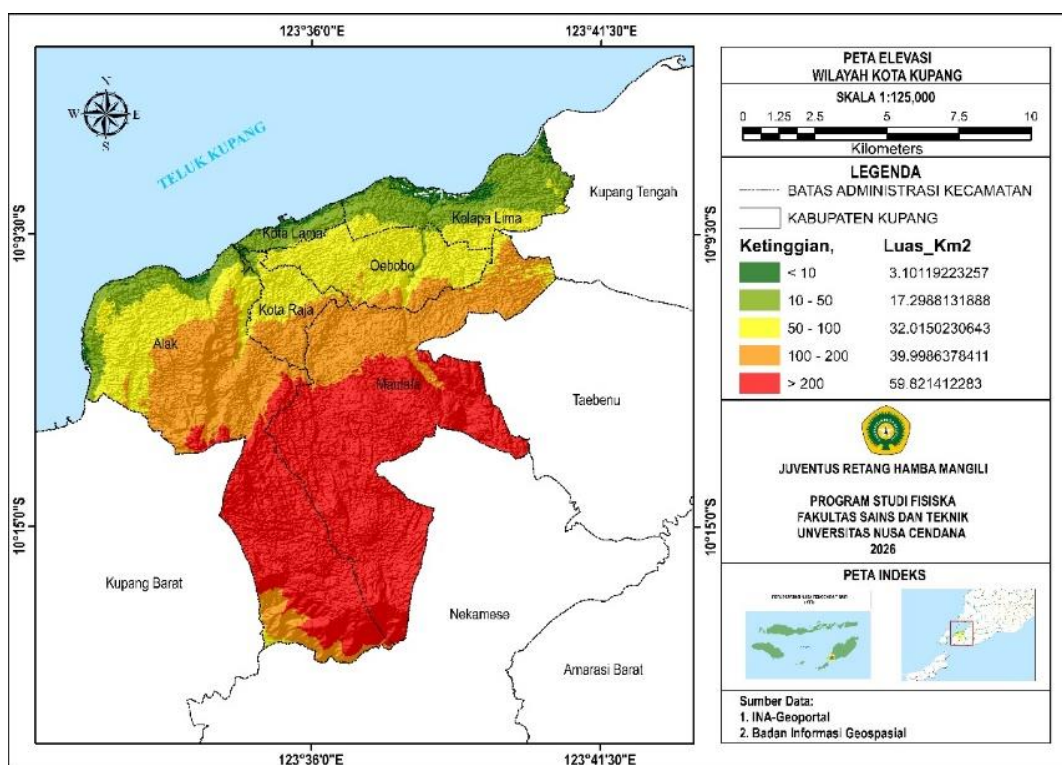
A_j = luas wilayah kelas ke-j (km²)

$\sum (k_j \times A_j)$ = total bobot tarikan seluruh wilayah

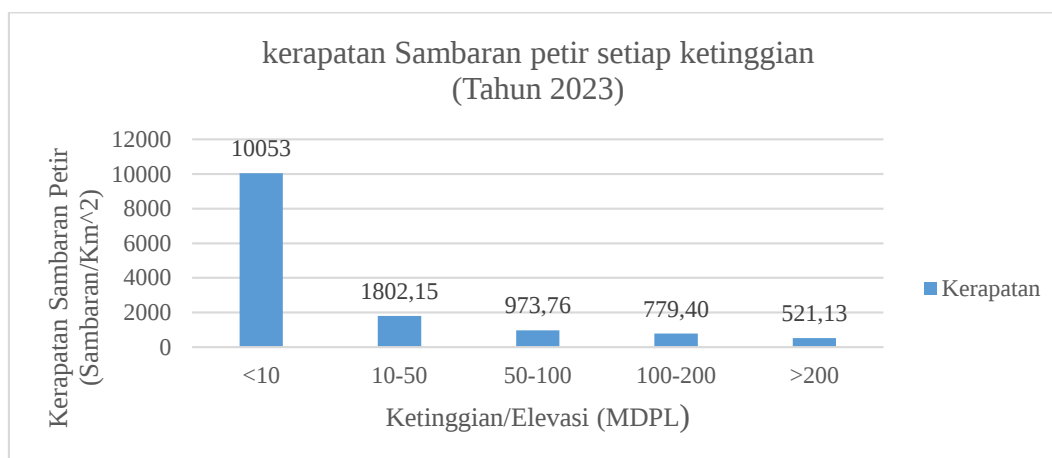
Indeks ini didasarkan pada asumsi bahwa bangunan padat meningkatkan tarikan petir melalui efek elektrostatik, struktur vertikal, dan *urban heat island*.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Analisis Kerapatan Petir CG Berdasarkan Ketinggian**

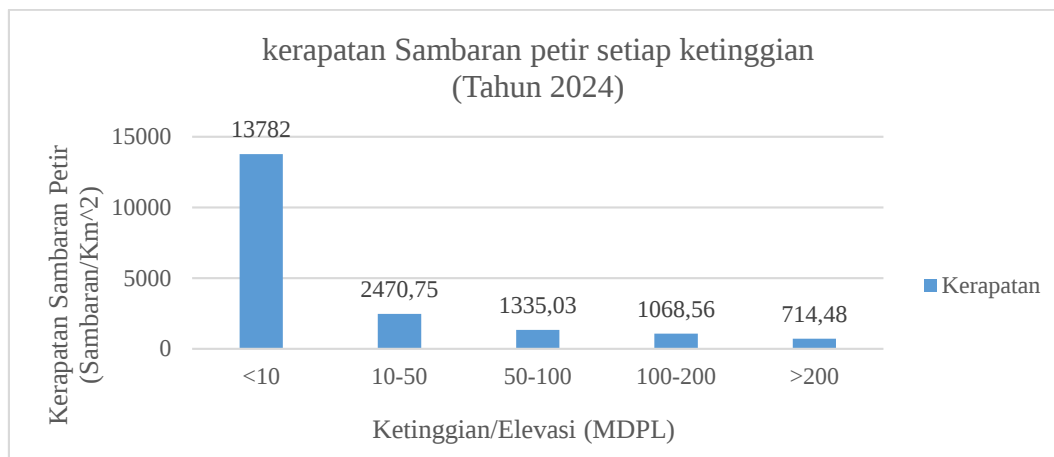
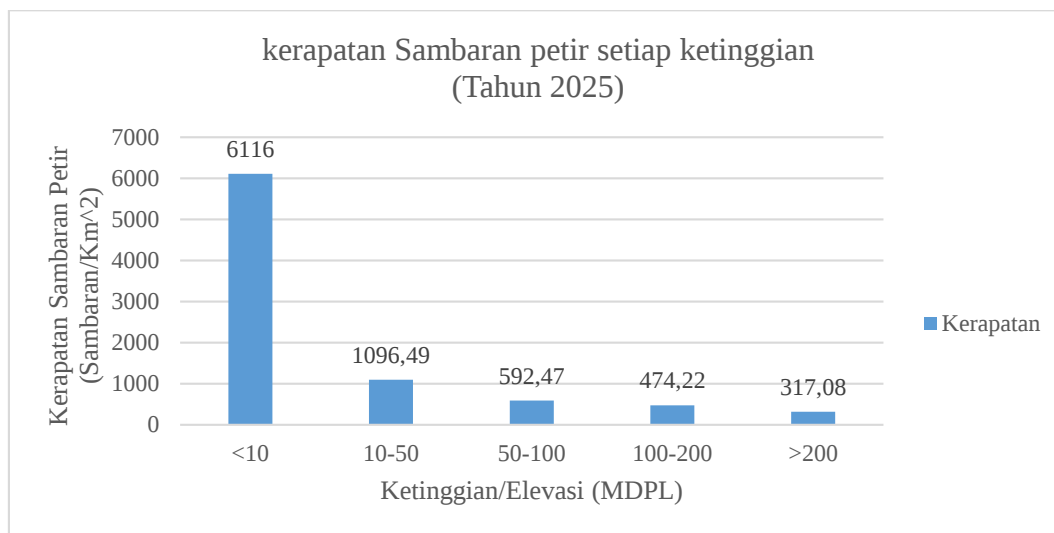
Distribusi kerapatan sambaran petir CG di Kota Kupang tahun 2023-2025 menunjukkan pola yang sangat jelas dan konsisten: kerapatan petir tidak berbanding lurus dengan ketinggian. Sebaliknya, kerapatan tertinggi selalu terjadi pada kelas ketinggian paling rendah, yaitu <10 mdpl, yang merupakan wilayah pesisir. Hal ini dibuktikan dengan hasil uji korelasi Spearman yang menunjukkan nilai $\rho = -0,89$ dengan tingkat signifikansi $p < 0,01$, yang mengindikasikan hubungan negatif yang sangat kuat dan signifikan secara statistik antara ketinggian dan kerapatan petir. Artinya, semakin tinggi elevasi suatu wilayah, semakin rendah kerapatan sambaran petir yang terjadi.



Gambar 2. Peta Ketinggian Wilayah Kota Kupang

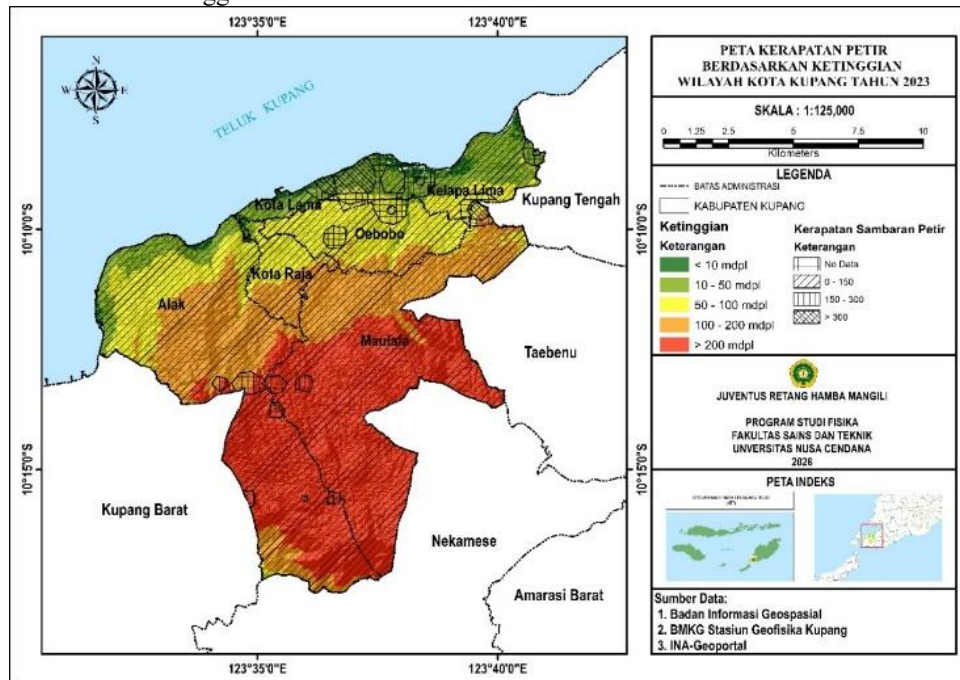


Gambar 3. Grafik Kerapatan Sambaran Petir Terhadap Ketinggian Tahun 2023

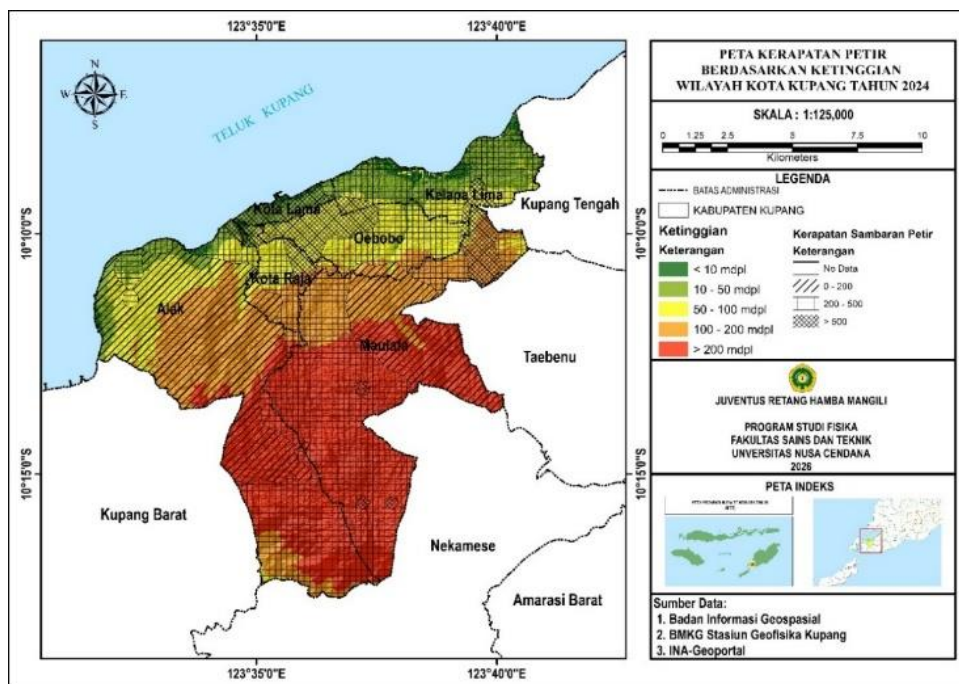
**Gambar 4.** Grafik Kerapatan Sambaran Petir Terhadap Ketinggian Tahun 2024**Gambar 5.** Grafik Kerapatan Sambaran Petir Terhadap Ketinggian Tahun 2025

Berdasarkan grafik tersebut, pada tahun 2023 kerapatan petir pada ketinggian <10 mdpl mencapai 10.053 sambaran/km². Angka ini melonjak menjadi 13.782 sambaran/km² pada tahun 2024 (periode dengan aktivitas petir tertinggi), dan tercatat 6.116 sambaran/km² pada tahun 2025. Seiring dengan peningkatan ketinggian, kerapatan petir menurun drastis. Pada ketinggian 10-50 mdpl, kerapatan turun menjadi 1.802 sambaran/km² (2023), 2.471 sambaran/km² (2024), dan 1.096 sambaran/km² (2025). Pada ketinggian >200 mdpl, kerapatan hanya berkisar antara 317 hingga 714 sambaran/km², atau kurang dari 10% dari kerapatan di wilayah pesisir. Rasio kerapatan antara

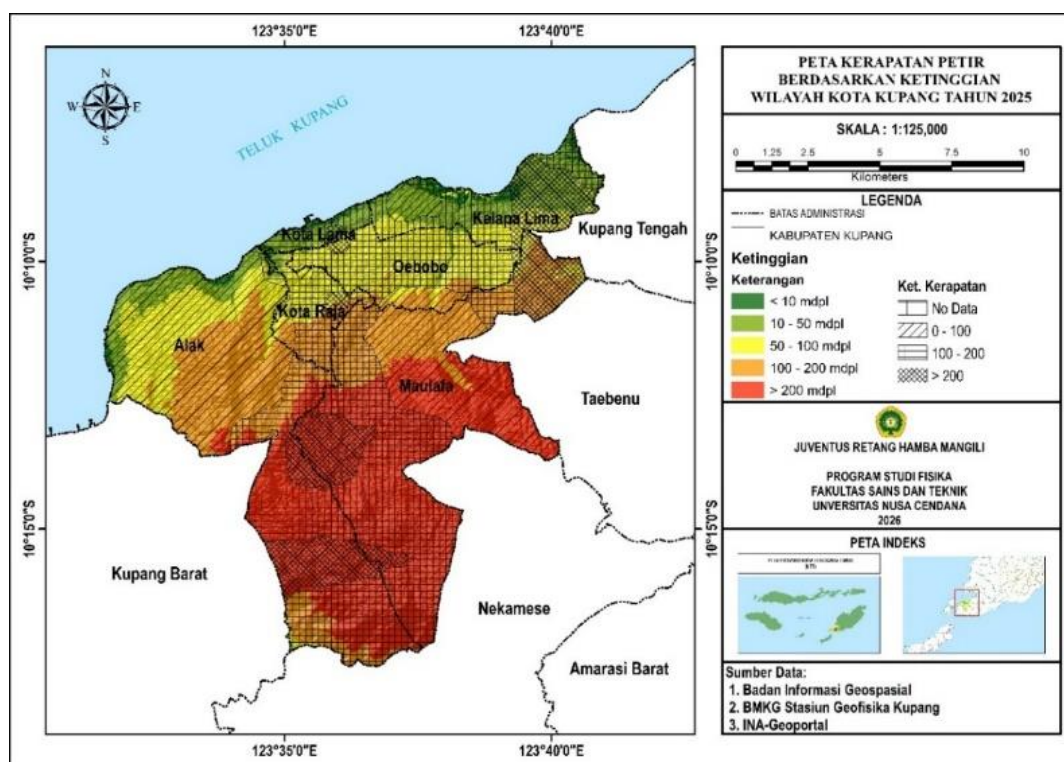
wilayah <10 mdpl dan >200 mdpl selalu sekitar 19:1. Secara spasial, Gambar 6-8 memperlihatkan distribusi kerapatan petir berdasarkan ketinggian.



Gambar 6. Peta Kerapatan Sambaran Petir Jenis Cloud To Ground Berdasrakan Ketinggian Kota Kupang Tahun 2023



Gambar 7. Peta Kerapatan Sambaran Petir Jenis Cloud To Ground Berdasrakan Ketinggian Kota Kupang Tahun 2024



Gambar 8. Peta Kerapatan Sambaran Petir Jenis Cloud To Ground Berdasarkan Ketinggian Kota Kupang Tahun 2025

Pada tahun 2023, kerapatan tertinggi mencapai 7.588 sambaran/km² terkonsentrasi di Kecamatan Kota Lama (elevasi <10 mdpl) dan Kelapa Lima dengan 1.626 sambaran/km². Wilayah perbukitan Maulafa (>200 mdpl) memiliki kerapatan kurang dari 50 sambaran/km². Pada tahun 2024, dampak petir meluas hingga ke ketinggian 10-50 mdpl dengan Kecamatan Kota Raja mencatat 2.349 sambaran/km² dan Oebobo 1.007 sambaran/km². Bahkan Kecamatan Maulafa yang biasanya rendah mencatat peningkatan hingga 230 sambaran/km². Pada tahun 2025, kerapatan mengerucut kembali ke wilayah pesisir dengan Kota Lama 3.373 sambaran/km² dan Kelapa Lima 723 sambaran/km², sementara wilayah >200 mdpl nyaris tidak tercatat sambaran.

Temuan ini menegaskan bahwa di Kota Kupang, faktor meteorologi lokal seperti ketersediaan uap air dari Wilayah pesisir Kota Kupang berbatasan langsung dengan Teluk Kupang yang memiliki suhu permukaan laut rata-rata 28-30°C. Suhu hangat ini menyebabkan evaporasi intensif, menghasilkan uap air yang melimpah di atmosfer, pemanasan permukaan yang intens, dan ketidakstabilan atmosfer di dataran rendah jauh lebih dominan dalam memicu konveksi pembentuk awan *Cumulonimbus* (Cb) dibandingkan faktor ketinggian daratan [8]. Meskipun secara teori elevasi lebih tinggi seharusnya lebih dekat dengan pusat muatan awan, di Kota Kupang efek topografi tidak mendominasi. Hal ini karena sumber uap air utama adalah laut di utara, dan massa udara lembap cenderung terkondensasi di wilayah pesisir sebelum mencapai perbukitan selatan. Selain itu, efek penghalang (barrier effect) dari perbukitan mengurangi jumlah uap air yang mencapai wilayah selatan, sehingga konveksi di sana lebih lemah. Hasil ini sejalan dengan penelitian Nenik dkk. (2025) di Kota Kupang yang menganalisis data petir tahun 2021-2022 dan menemukan bahwa distribusi kerapatan sambaran petir CG di Kota Kupang didominasi pada ketinggian 0-10 mdpl serta tidak berbanding lurus dengan pertambahan ketinggian [5]. Penelitian yang dilakukan oleh Narut dkk. (2018) juga menunjukkan bahwa wilayah pesisir dengan elevasi rendah memiliki aktivitas petir yang tinggi [2]. Di sisi lain, penelitian di Kabupaten Gowa oleh Firdaus dkk. (2021) menunjukkan bahwa sambaran petir dominan terjadi pada elevasi 1000-1500 mdpl [10]. Hasil yang berbeda juga dilaporkan oleh Cahyo dkk. (2023) [11] di Kabupaten Tuban, di mana kerapatan petir meningkat seiring ketinggian karena pengaruh orografis. Perbedaan ini disebabkan oleh mekanisme pembentukan awan konvektif yang berbeda, di wilayah pesisir seperti Kupang, sumber uap air utama adalah laut hangat yang memicu konveksi di dataran rendah; sementara di daerah pegunungan seperti Gowa dan Tuban, udara dipaksa naik oleh topografi (orografis) sehingga awan Cb terbentuk di ketinggian. Sementara di Kupang, konveksi termal pesisir lebih dominan karena kedekatan dengan laut dan efek UHI, sehingga petir terkonsentrasi di dataran rendah perkotaan. Hal ini menegaskan bahwa hubungan ketinggian-petir sangat

bergantung pada kondisi lokal, sejalan dengan pandangan Farias dkk. (2014) dan Shi dkk. (2022) [12], [13] bahwa faktor geografis dan morfologi kota berperan besar dalam distribusi petir.

Analisis Kerapatan Petir CG Berdasarkan Kepadatan Bangunan

Penerapan formula konvensional ($d = X/A$) menghasilkan anomali yang signifikan. Kelas non terbangun dengan luas wilayah sangat kecil (0,09-1,64 km²) justru menunjukkan kerapatan petir tertinggi: pada tahun 2023 mencapai 23.271 sambaran/km², tahun 2024 mencapai 26.048 sambaran/km², dan tahun 2025 mencapai 206.463 sambaran/km², yang secara fisis tidak masuk akal karena wilayah tersebut tidak memiliki bangunan yang dapat menarik sambaran petir. Hal ini menunjukkan kelemahan fundamental pendekatan konvensional yang sangat dipengaruhi oleh bias luas wilayah.

Tabel 2. Perbandingan Kerapatan Petir Menggunakan Formula Konvensional dan Formula Indeks Tarikan (Tahun 2023-2025)

Kepadatan Bangunan	Luas (km ²)	Metode	2023	2024	2025
Non Terbangun	2023 = 1,34	konvensional	23.271,0	26.048,0	206.463,0
	2024 = 1,64				
	2025 = 0,09				
Rendah	2023 = 11,12	Indeks Tarikan konvensional	2.802,6	2.998,0	2.149,6
	2024 = 14,25				
	2025 = 8,82				
Sedang	2023 = 38,80	Indeks Tarikan konvensional	803,4	956,0	408,1
	2024 = 44,70				
	2025 = 46,48				
Tinggi	2023 = 81,77	Indeks Tarikan konvensional	381,2	597,0	317,4
	2024 = 71,56				
	2025 = 59,75				
Sangat Tinggi	2023 = 19,56	Indeks Tarikan konvensional	1.594,0	2.091,0	506,5
	2024 = 20,44				
	2025 = 37,45				

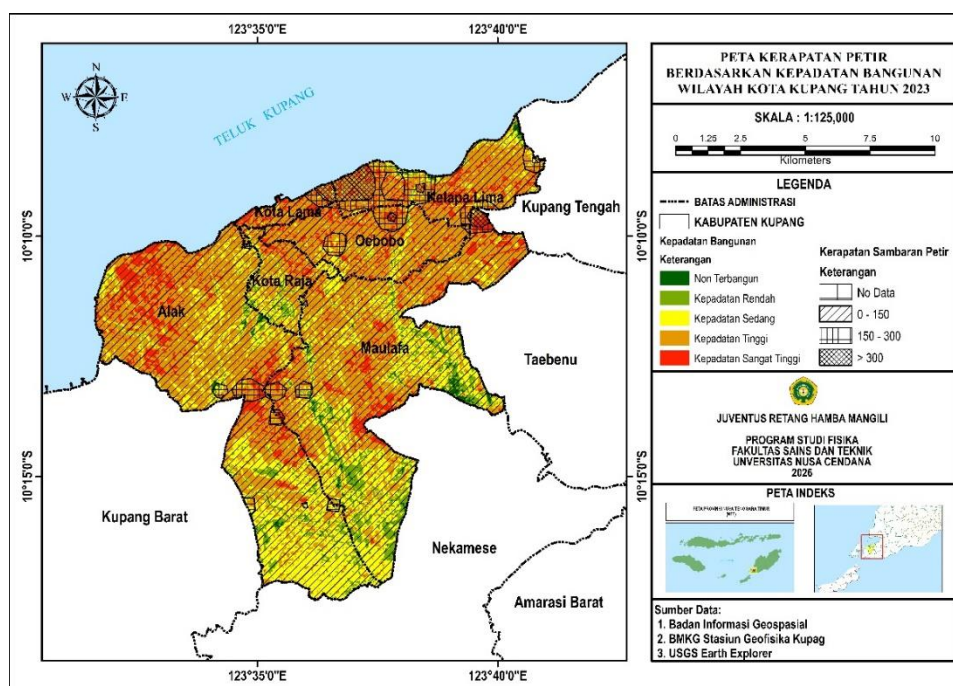
Pada formula konvensional, urutan kerapatan (tertinggi ke terendah) selalu ditempati oleh Non Terbangun karena luasnya yang sangat kecil, sementara kelas Sangat Tinggi (pusat kota padat) hanya berada di peringkat ketiga atau keempat. Hasil ini jelas tidak mencerminkan fakta bahwa wilayah perkotaan padat seharusnya lebih sering tersambar petir karena struktur vertikal, bahan logam, serta efek UHI. Sebaliknya, formula indeks tarikan petir yang dikembangkan berhasil mengungkap hubungan hierarkis positif yang sebenarnya. Urutan kerapatan petir selama tiga tahun selalu konsisten: Sangat Tinggi > Tinggi > Sedang > Rendah > Non Terbangun, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kerapatan Petir Berdasarkan Kepadatan Bangunan Menggunakan Formula Indeks Tarikan Tahun 2023-2025

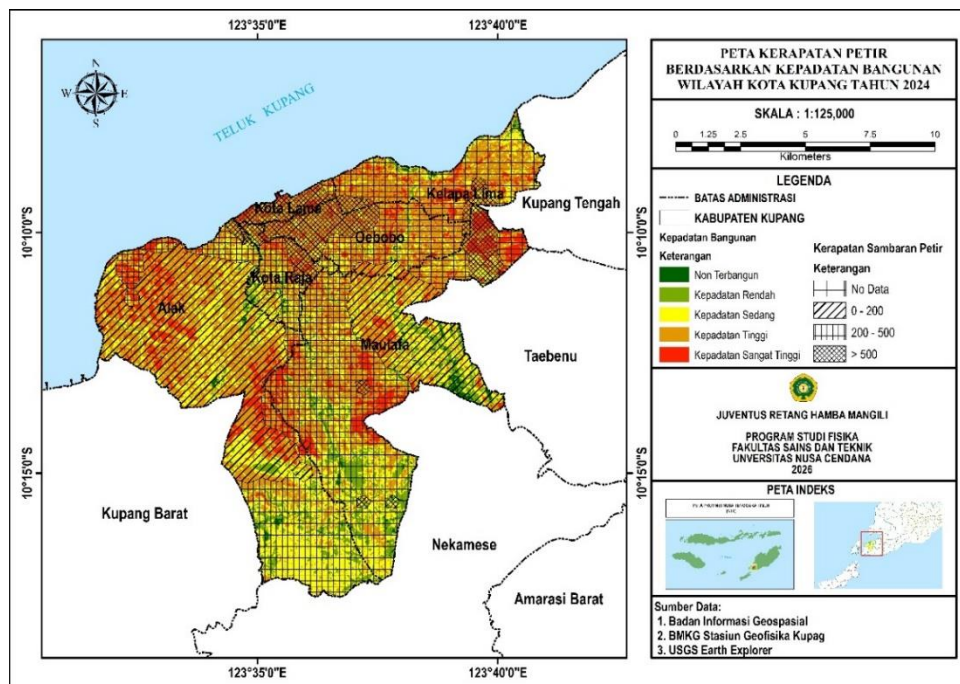
Kepadatan Bangunan	Indeks (k _i)	Kerapatan 2023	Kerapatan 2024	Kerapatan 2025	Perubahan 2023-2024 (%)	Perubahan 2024-2025 (%)
Non Terbangun	1	55,2	77,0	32,5	+39,5	-57,8
Rendah	2	110,4	154,7	65,0	+40,1	-58,0
Sedang	3	165,6	232,0	97,5	+40,1	-57,9
Tinggi	4	220,8	309,3	130,0	+40,1	-58,0
Sangat Tinggi	5	275,9	386,7	162,6	+40,1	-57,9

Pada tahun 2024 (periode intensitas tertinggi), kerapatan petir pada kelas kepadatan Sangat Tinggi mencapai 386,7 sambaran/km², sementara kelas Non Terbangun hanya 77,0 sambaran/km². Secara spasial, wilayah dengan kepadatan bangunan sangat tinggi, yaitu Kecamatan Kota Lama, Kota Raja, dan Oebobo (pusat kota), secara konsisten menjadi *hotspot* utama sambaran petir.

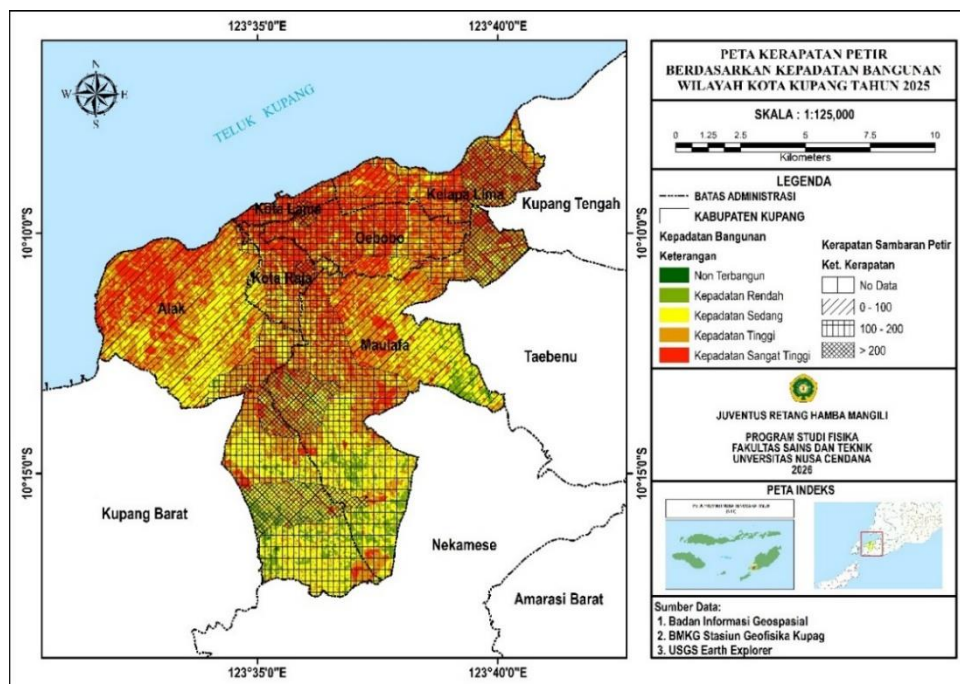
Struktur vertikal seperti gedung tinggi dan menara bertindak sebagai konsentrator medan listrik. Menurut prinsip elektrostatik, medan listrik pada ujung-ujung tajam atau struktur tinggi memiliki intensitas lebih besar karena kerapatan muatan yang lebih tinggi [8]. Hal ini disebabkan oleh persamaan medan listrik $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, di mana pada jarak yang lebih dekat ke permukaan (r lebih kecil), medan listrik menjadi lebih kuat. Wilayah perkotaan dengan kepadatan bangunan tinggi memiliki sifat termal yang berbeda dari area sekitarnya. Bangunan dan jalan aspal menyerap radiasi matahari pada siang hari dan melepaskannya secara perlahan pada malam hari, menciptakan pulau panas perkotaan dengan suhu 2-4°C lebih tinggi [11], [12]. Peningkatan suhu ini menghasilkan beberapa efek berantai: Meningkatkan ketidakstabilan atmosfer lokal (CAPE meningkat), Memperkuat arus udara naik (updraft) yang diperlukan untuk pembentukan awan Cb dan Mengurangi tekanan permukaan lokal, menciptakan area konvergensi yang menarik massa udara lembap dari sekitarnya. Studi Farias dkk. (2014) menunjukkan bahwa efek UHI dapat meningkatkan frekuensi petir di wilayah metropolitan hingga 15-25% dibandingkan area pedesaan di sekitarnya [12]. Shi dkk. (2022) juga melaporkan bahwa morfologi kota (skala dan kepadatan bangunan) berperan penting dalam mengubah pola petir [13]. Aktivitas perkotaan menghasilkan partikel halus (aerosol) dari emisi kendaraan, industri, dan debu konstruksi. Partikel-partikel ini bertindak sebagai inti kondensasi awan (Cloud Condensation Nuclei/CCN) yang meningkatkan jumlah tetesan air dalam awan [12]. Peningkatan CCN dapat memodifikasi mikrofisika awan dengan: Meningkatkan jumlah tetesan air tetapi memperkecil ukurannya (efek Twomey), menghambat proses koalesensi, sehingga memperpanjang umur awan dan mendorong pemisahan muatan (charge separation) yang lebih efektif dalam awan. Hasilnya, awan menjadi lebih intensif secara listrik dan menghasilkan lebih banyak sambaran petir [12]. Penelitian di berbagai kota besar menunjukkan bahwa aerosol perkotaan berkorelasi positif dengan aktivitas petir [13].



Gambar 9. Peta Kerapatan Petir CG Berdasarkan Kepadatan Bangunan di Kota Kupang Tahun 2023



Gambar 10. Peta Kerapatan Petir CG Berdasarkan Kepadatan Bangunan di Kota Kupang Tahun 2024



Gambar 11. Peta Kerapatan Petir CG Berdasarkan Kepadatan Bangunan di Kota Kupang Tahun 2025

Secara spasial, wilayah dengan kepadatan bangunan sangat tinggi (Gambar 9-11), yaitu Kecamatan Kota Lama, Kelapa Lima, dan Kota Raja (pusat kota), secara konsisten menjadi hotspot utama sambaran petir. Pada tahun 2024 (intensitas tertinggi), dampak petir meluas hingga ke wilayah kepadatan sedang di Kecamatan Oebobo dan Maulafa bagian utara. Sebaliknya, pada tahun 2025 (intensitas terendah), sebaran petir mengerucut hanya di kepadatan sangat tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika intensitas tahunan tinggi, efek tarikan bangunan semakin dominan dan mencakup area lebih luas.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Susanto (2018) di Kota Makassar yang menyatakan terdapat korelasi antara kepadatan bangunan dan frekuensi sambaran petir [6]. Taufik dkk. (2022) di Kuala Lumpur juga menunjukkan bahwa area dengan bangunan padat (gedung pencakar langit) memiliki kerapatan petir tinggi [8]. Riqmawatin & Intan (2020) di Pasuruan mengidentifikasi bahwa daerah dengan kepadatan bangunan tinggi termasuk zona rawan petir [9].

Perbedaan dengan penelitian Susanto (2018) di Makassar yang menemukan korelasi negatif ($r = -0,685$) dapat dijelaskan oleh perbedaan karakteristik lokal. Di Makassar, faktor lain seperti jenis tanah atau jarak dari pantai mungkin lebih dominan [6]. Sementara di Kupang, wilayah padat bangunan berada di dataran rendah pesisir yang juga merupakan zona konvektif aktif, sehingga efek tarikan petir menjadi dominan.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa faktor antropogenik memainkan peran signifikan. Bangunan-bangunan padat, terutama struktur vertikal dan material logam, bertindak sebagai penarik (*attractor*) sambaran petir. Efek *Urban Heat Island* (UHI) juga turut memperkuat konveksi lokal di atas wilayah perkotaan. Formula baru yang dikembangkan dalam penelitian ini menawarkan metode yang lebih akurat dan representatif untuk analisis serupa di wilayah urban lain.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data petir jenis Cloud to Ground (CG) di Kota Kupang tahun 2023-2025, disimpulkan bahwa kerapatan sambaran petir tidak berbanding lurus dengan ketinggian, melainkan tertinggi terjadi pada elevasi sangat rendah (<10 mdpl) di wilayah pesisir ($10.053-13.782$ sambaran/km²) dengan rasio sekitar 19:1 dibandingkan wilayah >200 mdpl. Sebaliknya, terdapat hubungan hierarkis positif antara kepadatan bangunan dan kerapatan petir, di mana wilayah dengan kepadatan sangat tinggi (pusat kota) menjadi hotspot utama ($386,7$ sambaran/km² pada tahun 2024). Formula indeks tarikan petir yang dikembangkan ($d_i = X_{total} \times k_i / \sum (k_j \times A_j)$) memberikan hasil yang lebih representatif dibandingkan pendekatan konvensional karena mampu mengoreksi bias luas wilayah dan mengungkap peran bangunan sebagai atraktor petir melalui efek elektrostatis, Urban Heat Island, dan aerosol perkotaan.

Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penyusunan mitigasi risiko sambaran petir pada kawasan perkotaan pesisir, khususnya untuk prioritas pemasangan sistem penangkal petir di kecamatan berkerapatan sangat tinggi (Kota Lama, Kota Raja, Oebobo). Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk menggunakan data petir jangka panjang (>10 tahun) guna analisis tren, menerapkan pendekatan *machine learning* untuk prediksi spasial petir, serta menambahkan analisis variabel meteorologi lainnya seperti kelembapan udara, suhu permukaan laut, dan indeks stabilitas atmosfer (CAPE).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Stasiun dan seluruh staf BMKG Stasiun Geofisika Kupang atas izin dan bantuan dalam pengumpulan data. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen Pembimbing dan seluruh pihak yang telah membantu selama proses penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Jiang *et al.*, "Characteristics of cloud-to-ground lightning (CG) and differences between +CG and -CG strokes in China regarding the China National Lightning Detection Network," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 23, no. 12, pp. 3747–3759, Dec. 2023, doi: 10.5194/nhess-23-3747-2023.
- [2] F. Narut, A. Wahid, and S. Sumawan, "Karakterisasi Peristiwa Petir Di Wilayah Kota Kupang Serta Keterkaitannya Dengan Curah Hujan," *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 3, no. 2, pp. 110–116, Dec. 2018, doi: 10.35508/fisa.v3i2.611
- [3] 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," in *Prosiding Seminar Nasional Fisika PPs UNM*, 2020, vol. 2, pp. 96–99, [Online]. Available: <https://ojs.unm.ac.id/semnasfisika>
- [4] PKP Kota Kupang, "Profil Perumahan Dan Kawasan Permukiman Kota Kupang," *PKP Kota Kupang*, 2022. [Online]. Available: <https://perkim.id>. [Accessed: 18-Sep-2025].
- [5] Y. Nenek, Abdul Wahid, Philips B. Mudamakin, Hadi I. Sutaji, and Arief Tyastam, "Analisis Kerapatan Sambaran Petir Jenis Cloud To Ground Berbasis Sistem Informasi Geografis di Kota Kupang Tahun 2021-2022," *Magn. Res. J. Phys. It's Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 481–488, 2025, doi: 10.59632/magnetic.v5i2.499
- [6] E. Susanto, "Analisis Korelasi Kepadatan Bangunan Terhadap Frekuensi Sambaran Petir di Wilayah Kota Makassar," in *Prosiding Seminar Nasional Fisika 2018 Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 1–4, [Online]. Available: <https://ojs.unm.ac.id/semnasfisika>

- [7] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, "Informasi Petir," *Stasiun Geofisika Kupang*, 2025. [Online]. Available: <https://stageof-kupang.bmkg.go.id/informasi-petir/>. [Accessed: 20-Jul-2025].
- [8] A. N. A. Taufik *et al.*, "Lightning Observation around Tall Structures in Kuala Lumpur, Malaysia," in *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, 2022, vol. 3, no. March, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPEA53519.2022.9744646.
- [9] S. R. Riqmawatin and P. K. Intan, "Analisa Pemetaan Daerah Rawan Sambaran Petir Di Wilayah Kabupaten Pasuruan dengan Menggunakan Metode Simple Additive Weighting," *J. Mhs. Mat. Algebr.*, vol. 1, no. 1, pp. 198–210, 2020, [Online]. Available: <http://repository.uinsa.ac.id/id/eprint/2576>
- [10] M. L. Firdaus, N. Nasiah, and U. Uca, "Studi Spasiotemporal Sambaran Petir Cloud To Ground Di Kabupaten Gowa Tahun 2017-2019," *J. Environ. Sci.*, vol. 3, no. 2, Apr. 2021, doi: 10.35580/jes.v3i2.20050.
- [11] R. H. D. Cahyo, Ardimas, Y. D. Anggara, A. Puspitasari, and Peredianto, "Cloud to Ground Lightning Strike Density Analysis Based on Geographic Information System in Tuban Regency Area," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2623, no. 1, p. 012006, Nov. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2623/1/012006.
- [12] W. R. G. Farias, O. Pinto, I. R. C. A. Pinto, and K. P. Naccarato, "The influence of urban effect on lightning activity: Evidence of weekly cycle," *Atmos. Res.*, vol. 135–136, pp. 370–373, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.atmosres.2012.09.007.
- [13] T. Shi *et al.*, "Potential Urban Barrier Effect to Alter Patterns of Cloud To Ground Lightning in Beijing Metropolis," *Geophys. Res. Lett.*, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1016/j.atmosres.2012.09.007.