

KARAKTERISTIK DAN MEKANISME PEMBENTUKAN PUTING BELIUNG DI INDONESIA BERBASIS DATA OBSERVASI DAN SIMULASI MODEL NUMERIK

KIKI



**PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Karakteristik dan Mekanisme Pembentukan Puting Beliung di Indonesia Berbasis Data Observasi dan Simulasi Model Numerik” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Kiki
G2601231003

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

KIKI. Karakteristik dan Mekanisme Pembentukan Puting Beliung di Indonesia Berbasis Data Observasi dan Simulasi Model Numerik. Dibimbing oleh YONNY KOESMARYONO, RAHMAT HIDAYAT, DONALDI SUKMA PERMANA dan PERDINAN.

Di Indonesia, puting beliung menjadi ancaman hidrometeorologi yang sulit diprediksi karena skala ruangnya yang lokal dan durasi hidup yang singkat. Dinamika atmosfer kepulauan yang kompleks, interaksi angin darat-laut, serta pengaruh orografis menciptakan ketidakstabilan udara yang memicu pertumbuhan awan konvektif penghasil pusaran vertikal merusak. Kurangnya pemahaman mengenai mekanisme pembentukan serta keterbatasan resolusi pengamatan konvensional menjadi tantangan utama dalam pembangunan sistem peringatan dini yang akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola distribusi spasial temporal dan tren PB secara nasional, mengidentifikasi pola khas pada berbagai instrumen observasi, serta menjelaskan mekanisme pembentukannya melalui integrasi pemodelan numerik resolusi tinggi. Database kejadian PB periode Januari 2011 hingga Desember 2025 dari BNPB, BMKG, dan Kemenkes RI diintegrasikan dan dianalisis nilai statistiknya sementara tren menggunakan uji Mann-Kendall. Analisis *signature* PB diidentifikasi pada data data radar cuaca BMKG, satelit Himawari-9, AWS/AAWS, dan radiosonde BMKG. Model *Weather Research and Forecasting* (WRF) resolusi tinggi dengan input data reanalisis ERA5 diaplikasikan untuk merekonstruksi mekanisme pembentukan pada studi kasus Rancaekek (Februari 2024).

Penelitian menunjukkan frekuensi kejadian PB secara nasional memiliki rata-rata 101 kejadian per tahun, dengan adanya tren peningkatan secara nasional, terkonsentrasi di Pulau Jawa akibat dinamika atmosfer lokal dan faktor antropogenik. Temuan baru menunjukkan bahwa PB di Indonesia umumnya bersifat non-superseluler (*landspout*) dengan mekanisme *bottom-up* yang tumbuh dari awan Cumulonimbus bersuhu puncak -60°C hingga -80°C tanpa harus bergantung pada fitur *overshooting top* (OT). Secara temporal, fenomena ini memuncak pada pukul 15.00 LT dengan pergeseran tren bulan puncak dari Oktober ke Januari-Februari dalam 15 tahun terakhir. Karakteristik radar mengidentifikasi nilai reflektivitas maksimum 35–60 dBZ dengan variasi pola *echo* khas seperti *hook echo*, *bow echo*, *v-shape*, dan *line-shape*. Analisis termodinamika menunjukkan anomali suhu permukaan yang tinggi, indeks stabilitas udara yang labil moderat hingga kuat. Simulasi numerik kasus Rancaekek menunjukkan bahwa fenomena PB terbentuk dari proses *vortex stretching* akibat konvergensi angin kuat di lapisan bawah atmosfer. Keunikan karakteristik awan penghasil PB Indonesia yang memiliki siklus hidup relatif singkat (30–40 menit) menuntut penguatan sistem peringatan dini berbasis regional yang lebih responsif. Temuan ini merekomendasikan perlunya transformasi infrastruktur pengamatan, termasuk penggunaan radar dengan resolusi temporal lebih tinggi (1–5 menit) di wilayah hotspot, guna meningkatkan akurasi nowcasting dan resiliensi masyarakat terhadap ancaman cuaca ekstrem.

Kata kunci: karakteristik, mekanisme, puting beliung, simulasi, model WRF.

SUMMARY

KIKI. Characteristics and Formation Mechanisms of Puting Beliung in Indonesia Based on Observational Data and Numerical Model Simulations. Supervised by YONNY KOESMARYONO, RAHMAT HIDAYAT, DONALDI SUKMA PERMANA and PERDINAN.

In Indonesia, tornado-like vortices (locally known as *puting beliung*) pose a hydrometeorological threat that is difficult to predict due to their localized spatial scale and short lifespans. The complex atmospheric dynamics of the archipelago, land-sea breeze interactions, and orographic influences create extreme instabilities that trigger the growth of convective clouds, producing destructive vertical vortices. A lack of understanding regarding their formation mechanisms, combined with the limited resolution of conventional observations, remains a major challenge in developing accurate early warning systems. This study aims to analyze national spatiotemporal distribution patterns and trends, identify distinctive signatures across various observational instruments, and explain formation mechanisms through high-resolution numerical modeling. The research integrates a database of PB events from January 2011 to December 2025, sourced from BNPB, BMKG, and the Ministry of Health, utilizing the Mann-Kendall test for trend analysis. PB signatures were identified using BMKG weather radar, Himawari-9 satellite, AWS/AAWS, and radiosonde data. Furthermore, high-resolution Weather Research and Forecasting (WRF) simulations with ERA5 reanalysis as input were used to reconstruct the mechanisms of formation for the Rancaekek case study in February 2024.

The study reveals that PB frequency nationwide averages 101 events per year, indicating an increasing national trend, concentrated on Java Island driven by local atmospheric dynamics and anthropogenic factors. New findings indicate that PB in Indonesia is generally non-supercellular (landspout), driven by a bottom-up mechanism originating from Cumulonimbus clouds with cloud-top temperatures between -60°C and -80°C , without necessarily depending on overshooting top (OT) features. Temporally, these phenomena peak at 15:00 LT, with a shift in peak occurrence months from October toward January-February over the last 15 years. Radar characteristics indicate maximum reflectivity values of 35–60 dBZ, with distinctive echo patterns including hook, bow, v-shapes, and line-shapes echoes. Thermodynamic analysis reveals high surface-temperature anomalies and moderate-to-strong atmospheric instability. Numerical simulations of the Rancaekek case demonstrate that the PB phenomenon was formed through a vortex stretching process resulting from strong wind convergence in the lower atmospheric layers. The unique characteristics of Indonesian PB-producing clouds, which have a relatively short lifecycle (30–40 minutes), necessitate the strengthening of more responsive, region-based early warning systems. These findings recommend transforming observational infrastructure, including deploying radars with higher temporal resolution (1–5 minutes) in hotspot areas, to improve nowcasting accuracy and community resilience against extreme weather threats.

keywords: characteristics, mechanism, tornadoes, simulation, WRF model.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

KARAKTERISTIK DAN MEKANISME PEMBENTUKAN PUTING BELIUNG DI INDONESIA BERBASIS DATA OBSERVASI DAN SIMULASI MODEL NUMERIK

KIKI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Klimatologi Terapan

**PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Ida Pramuwardani, ST., M.Si
- 2 Givo Alsepan, S.Si, M.Sc, P.hD

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Andri Ramdhani, SKom., M.Sc
- 2 Givo Alsepan, S.Si, M.Sc, Ph.D

Judul Disertasi : Karakteristik dan Mekanisme Pembentukan Puting Beliung di Indonesia Berbasis Data Observasi dan Simulasi Model Numerik

Nama : Kiki

NIM : G2601231003

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Yonny Koesmaryono, MS

digitally signed

esign.ipb.ac.id

Pembimbing 2:
Dr. Rahmat Hidayat, S.Si, M.Si

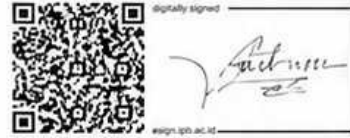
digitally signed

esign.ipb.ac.id

Pembimbing 3:
Dr. Donald Sukma Permana, M.Sc



Pembimbing 4:
Perdinan, S.Si., M.nat.res.Econ., Ph.D

digitally signed

esign.ipb.ac.id

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc
NIP 196328061988032001



Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam:
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP. 197807232007011001





Tanggal Ujian Tertutup : 25 Mei 2026
Tanggal Sidang Promosi : 30 Juni 2026

Tanggal Lulus :

PRAKATA

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan November 2024 sampai bulan April 2026 ini ialah puting beliung, dengan judul “Karakteristik dan Mekanisme Pembentukan Puting Beliung di Indonesia Berbasis Data Observasi dan Simulasi Model Numerik”.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah mendukung selama studi:

1. Prof. Dr. Ir. Yonny Koesmaryono, MS, Dr. Rahmat Hidayat, M.Si, Dr. Donald Sukma Permana, M.Sc, dan Dr. Perdinan, MNRE, selaku komisi pembimbing, atas bimbingan, arahan, motivasi, serta masukan berharga yang diberikan selama proses pelaksanaan penelitian dan penulisan disertasi ini.
2. Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Jakarta, Prof. Ir. Teuku Faisal Fathani, Ph.D, atas izin dan kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh pendidikan S3.
3. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) RI, yang telah memberikan beasiswa studi S3 kepada penulis di SPs IPB University.
4. Rektor IPB University, Prof. Dr. Arif Satria, S.P, M.Si yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menuntut ilmu di program studi KLI dan menambah wawasan, relasi serta pengalaman di IPB University.
5. Dr. I Putu Santikayasa, S.Si, M.Sc, Ketua Program Studi Klimatologi Terapan periode (2019-2025), Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc, selaku Ketua Program Studi Klimatologi Terapan beserta staf akademik program studi KLI atas bimbingan, bantuan dan arahan selama masa studi.
6. Kedua orangtua saya, Bapak Yasmin Budi Santoso dan Ibu Rogayah, mertua (Almarhun Bapak Anwar dan Ibu Juju), suami, keempat anak saya (Aqila Nafisha R., Rifqi Azka R., Abqory Zaydan R., dan Atthoriq Zayn R.), serta adik-adik saya atas dukungan doa, moril, dan kasih sayangnya.
7. Rekan-rekan saya di BMKG, dan STMKG atas bantuannya dalam teknis pelaksanaan penelitian ini.
8. Rekan-rekan seperjuangan di Program Studi Klimatologi Terapan, atas semua bantuan, saran, masukan dan persahabatan yang terjalin selama menyelesaikan studi di IPB University.
9. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah mendukung dan membantu setiap proses, sehingga penelitian dapat diselesaikan.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Kiki



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	5
1.7 Hipotesis	5
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Karakteristik Puting Beliung	7
2.2 Perbedaan Karakteristik Puting Beliung dan Tornado	8
2.3 Mekanisme Pembentukan Puting Beliung	11
2.4 Dampak Puting Beliung	11
2.5 Kondisi Cuaca Permukaan saat Terjadi Puting Beliung	11
2.6 <i>Signature</i> Puting Beliung pada Data Radar Cuaca	12
2.7 <i>Signature</i> Puting Beliung pada Data Satelit Cuaca	13
2.8 Kondisi Stabilitas Atmosfer	13
2.9 Aspek Topografi	13
2.10 Simulasi dan Prediksi Puting Beliung	14
2.11 Strategi Mitigasi dan Adaptasi	14
2.12 Kesenjangan Penelitian Puting Beliung	15
2.13 Arah Penelitian Puting Beliung ke depan	16
METODE	17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.3 Prosedur Kerja	18
3.4 Analisis data	19
ANALISIS DISTRIBUSI SPASIAL TEMPORAL DAN TREN PUTING BELIUNG DI INDONESIA	21
4.1 Abstrak	21
4.2 Pendahuluan	21
4.3 Metode	22
4.4 Hasil dan Pembahasan	25
4.5 Kesimpulan	45
SIGNATURE PUTING BELIUNG PADA DATA OBSERVASI	47
5.1 Abstrak	47
5.2 Pendahuluan	47
5.3 Metode	48
5.4 Hasil dan Pembahasan	53
5.5 Kesimpulan	89

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

VI	MEKANISME PEMBENTUKAN PUTING BELIUNG DI WILAYAH INDONESIA	91
6.1	Abstrak	91
6.2	Pendahuluan	91
6.3	Metode	93
6.4	Hasil dan Pembahasan	100
6.5	Kesimpulan	123
VII	PEMBAHASAN UMUM	125
VIII	SIMPULAN DAN SARAN	133
8.1	Simpulan Umum	133
8.2	Limitasi Penelitian	134
8.3	Saran	135
	DAFTAR PUSTAKA	137
	LAMPIRAN	147
	RIWAYAT HIDUP	158