Karakteristik Temporal Meteorologi Kejadian Frost di Dataran Tinggi Dieng: Studi Kasus Tahun 2025

Didik Kurniawan[1], Satria Mahawira Adhi Pradana[2], Helena Yaku[3], Ogi Rahmawan Adi Saputro4, Yosafat Donni Harjanto[5]
[1,2,3,4,5]Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia
E-mail: kurniawandidik607@gmail.com

Article History:
Received: 01 Agustus 2026
Revised: 21 Oktober 2026
Accepted: 04 November 2026

Keywords: *Frost, Dataran Tinggi Dieng, Karakteristik Temporal, Pendinginan Malam, AWS.*

Abstrak: *Frost di Dataran Tinggi Dieng merupakan bahaya agrometeorologi berulang yang dapat merusak tanaman hortikultura. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik temporal unsur meteorologi selama kejadian frost tahun 2025 menggunakan data Automatic Weather Station Batur beresolusi 10 menit. Sepuluh malam frost dikelompokkan menjadi lima episode dan dibandingkan dengan sepuluh malam tanpa frost yang dipilih secara berpasangan pada bulan yang sama. Analisis mencakup komposit waktu ±24 jam terhadap pukul 06.00 WIB, statistik malam pukul 18.00–06.50 WIB, uji Wilcoxon berpasangan, koreksi Benjamini–Hochberg, dan ukuran efek rank-biserial. Median suhu minimum malam frost sebesar 3,80 °C, lebih rendah daripada malam kontrol sebesar 9,39 °C, dengan suhu terendah 1,10 °C. Penurunan suhu pukul 18.00–06.00 WIB pada malam frost mencapai median 8,53 °C dan berbeda signifikan dari kontrol. Malam frost juga cenderung berangin lemah dan memiliki depresi titik embun minimum lebih kecil, sedangkan tekanan udara serta curah hujan sebelumnya tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Interpretasi kelembapan dilakukan secara hati-hati karena ditemukan diskontinuitas dan efek batas atas sensor. Hasil menunjukkan bahwa frost Dieng tahun 2025 terutama dicirikan oleh pendinginan malam yang kuat dan berkelanjutan, suhu minimum rendah, serta angin lemah.*

PENDAHULUAN

Dataran Tinggi Dieng merupakan kawasan pertanian hortikultura dataran tinggi yang rentan terhadap frost atau embun beku, yang secara lokal dikenal sebagai embun upas. Fenomena ini tidak hanya menjadi daya tarik wisata, tetapi juga merupakan bahaya agrometeorologi karena pembentukan es pada permukaan tanaman dapat menyebabkan jaringan daun mengering dan menurunkan hasil produksi. Pemetaan bahaya di Dieng menunjukkan bahwa sebagian lahan pertanian kentang berada pada zona bahaya frost tinggi dan kejadian frost dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang besar bagi petani (Pradana et al., 2018). Kebutuhan terhadap informasi

meteorologi yang cepat selanjutnya mendorong pengembangan sistem pemantauan frost secara waktu nyata untuk mendukung kewaspadaan pertanian di kawasan tersebut (Jufri et al., 2024).

Frost radiasi berkembang ketika permukaan kehilangan energi melalui pancaran gelombang panjang pada malam yang relatif cerah dan tenang. Apabila kehilangan energi tersebut tidak diimbangi oleh fluks panas dari tanah maupun pencampuran atmosfer, suhu permukaan dan lapisan udara dekat permukaan terus menurun (Snyder & de Melo-Abreu, 2005). Angin lemah mengurangi pencampuran turbulen sehingga lapisan stabil dapat bertahan. Pada medan pegunungan dan cekungan, udara dingin yang lebih rapat juga dapat mengalir menuruni lereng dan terakumulasi sebagai kantong udara dingin (Clements et al., 2003; Burns & Chemel, 2014). Penelitian yang lebih baru menegaskan bahwa bentuk topografi, keterlindungan lembah, dan drainase udara dingin berperan penting dalam pembentukan cold-air pooling pada malam stabil (Rochette Cordeiro et al., 2023).

Pembentukan frost tidak hanya ditentukan oleh suhu udara minimum. Ketersediaan uap air memengaruhi deposisi atau pembekuan pada permukaan, sedangkan kecepatan angin menentukan kuat-lemahnya pertukaran panas dan pencampuran vertikal. Karena itu, suhu udara, titik embun, depresi titik embun, kelembapan relatif, kecepatan angin, tekanan udara, dan curah hujan sebelum kejadian perlu dianalisis secara bersamaan. Berdasarkan delapan kejadian tahun 2023, Kristianto et al. (2026) menemukan bahwa frost Dieng berkaitan dengan suhu malam mendekati atau lebih rendah dari 4 °C, titik embun dekat dengan suhu udara, kelembapan relatif di atas 95%, dan kecepatan angin di bawah 2 m s^{-1}. Temuan tersebut juga menunjukkan bahwa frost pada permukaan dapat terbentuk ketika suhu udara pada ketinggian sensor masih berada di atas 0 °C.

Kajian sebelumnya di Dieng telah mencakup pemetaan bahaya dan dampak pada pertanian (Pradana et al., 2018), pemanfaatan keluaran prakiraan subseasonal-to-seasonal untuk mengantisipasi suhu minimum rendah (Aini & Faqih, 2021), pengembangan sistem pemantauan frost (Jufri et al., 2024), serta analisis kondisi atmosfer dan performa model WRF-ARW pada kejadian frost (Kristianto et al., 2026). Meskipun demikian, evolusi unsur meteorologi secara berkelanjutan sebelum, selama, dan setelah kejadian frost dalam satu tahun studi kasus belum banyak dijelaskan menggunakan observasi 10 menit. Nilai minimum harian saja belum menunjukkan kapan pendinginan mulai menguat, seberapa besar suhu turun sepanjang malam, dan bagaimana perubahan suhu terjadi bersamaan dengan perubahan kelembapan, titik embun, angin, tekanan, dan hujan.

Penelitian ini menganalisis 10 malam frost yang membentuk lima episode selama tahun 2025. Tujuannya adalah: (1) mengidentifikasi pola temporal unsur meteorologi dalam jendela 24 jam sebelum dan sesudah waktu acuan kejadian; (2) membandingkan karakteristik malam frost dengan malam tanpa frost yang dipilih secara berpasangan; (3) mengukur besarnya perbedaan setiap unsur meteorologi; dan (4) menentukan unsur yang paling konsisten mencirikan frost tahun 2025. Penelitian ini bersifat karakterisasi observasional dan tidak dimaksudkan untuk menghasilkan ambang prediksi operasional yang berlaku universal.

METODE PENELITIAN

Lokasi, Data, dan Periode Penelitian

Penelitian dilakukan untuk kawasan Dataran Tinggi Dieng dengan menggunakan data Automatic Weather Station (AWS) Batur tahun 2025. Data memiliki resolusi temporal 10 menit dan mencakup suhu udara rata-rata, suhu udara minimum, kelembapan relatif, tekanan udara, kecepatan angin, arah angin, dan curah hujan. Suhu titik embun dan depresi titik embun dihitung dari suhu udara dan kelembapan relatif. Penggunaan AWS Batur selaras dengan penelitian

sebelumnya yang menganalisis karakteristik frost Dieng menggunakan observasi 10 menit (Kristianto et al., 2026).

Daftar kejadian diperoleh dari inventori terverifikasi penelitian yang menggabungkan informasi BMKG, pemberitaan, dokumentasi lapangan, dan dokumentasi masyarakat. Tahun 2025 memuat 10 malam frost, yaitu 28 April; 10, 11, 12, 18, 19, 20, 21, 27, dan 30 Juli. Tanggal berurutan dikelompokkan menjadi satu episode sehingga diperoleh lima episode. Status kekuatan bukti setiap tanggal dipertahankan untuk menjaga transparansi inventori.

Kendali Mutu dan Pembentukan Sampel

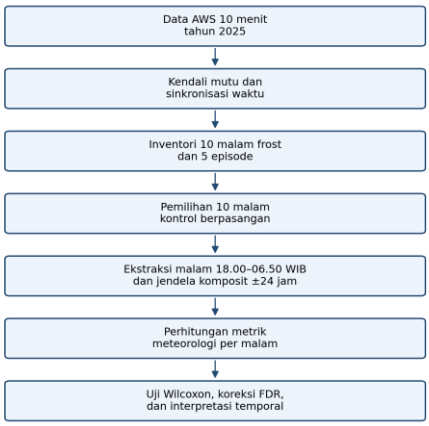
Kendali mutu mencakup pemeriksaan urutan waktu, duplikasi, kelengkapan, nilai hilang, rentang fisik, dan konsistensi antarvariabel. Prinsip pemeriksaan mengikuti pedoman pengamatan meteorologi WMO yang menekankan keterlacakan data, dokumentasi nilai hilang, serta verifikasi perilaku sensor (World Meteorological Organization, 2021). Satu malam didefinisikan sejak pukul 18.00 WIB pada hari sebelumnya hingga pukul 06.50 WIB pada tanggal kejadian. Untuk analisis komposit, digunakan jendela ±24 jam terhadap pukul 06.00 WIB pada tanggal kejadian.

Setiap malam frost dipasangkan dengan satu malam tanpa frost yang paling dekat pada bulan yang sama. Malam kontrol harus unik dan tidak berada dalam rentang satu hari sebelum atau sesudah tanggal frost. Pendekatan berpasangan digunakan untuk mengurangi pengaruh perbedaan musiman, walaupun tidak sepenuhnya menghilangkan variasi kondisi sinoptik antarhari.

Metrik Meteorologi dan Analisis Statistik

Metrik yang dihitung untuk setiap malam meliputi suhu minimum dan rata-rata malam, waktu suhu minimum, penurunan suhu pukul 18.00–00.00 WIB, penurunan suhu pukul 18.00–06.00 WIB, kelembapan relatif rata-rata dan maksimum, depresi titik embun minimum dan rata-rata, kecepatan angin median dan rata-rata, persentase waktu dengan kecepatan angin ≤ 2 m s^{-1}, tekanan udara rata-rata, perubahan tekanan pukul 18.00–06.00 WIB, dan curah hujan 24 jam sebelum malam analisis. Nilai depresi titik embun dihitung sebagai selisih suhu udara dan suhu titik embun.

Perbedaan malam frost dan malam kontrol diuji menggunakan uji Wilcoxon signed-rank karena sampel berpasangan berjumlah kecil dan distribusi tidak diasumsikan normal (Wilcoxon, 1945). Nilai p dari beberapa pengujian dikoreksi menggunakan prosedur Benjamini–Hochberg untuk mengendalikan false discovery rate pada taraf 0,05 (Benjamini & Hochberg, 1995). Besar perbedaan dinyatakan dengan ukuran efek rank-biserial berpasangan. Analisis dilakukan menggunakan Python dengan pustaka Pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib, dan XlsxWriter.



Gambar 1. Diagram alur penelitian

Sumber: Diolah oleh penulis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventori Kejadian dan Pembentukan Episode

Inventori tahun 2025 terdiri atas 10 malam frost yang dikelompokkan menjadi lima episode. Sembilan malam terjadi pada Juli, sedangkan satu malam terjadi pada akhir April. Episode terpanjang berlangsung pada 18–21 Juli dengan empat malam berturut-turut. Pengelompokan episode diperlukan karena malam berturut-turut tidak sepenuhnya independen dan dapat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer regional yang sama. Tabel 1 menyajikan tanggal, status bukti, episode, dan malam kontrol yang digunakan pada analisis berpasangan.

Tabel 1. Inventori kejadian frost dan malam kontrol tahun 2025

Tanggal frost	Status	Episode	Tanggal kontrol	Selisih (hari)
28-04-2025	Valid	Episode 1	26-04-2025	2
10-07-2025	Valid	Episode 2	08-07-2025	2
11-07-2025	Valid	Episode 2	07-07-2025	4
12-07-2025	Valid–dokumentasi sosial	Episode 2	06-07-2025	6
18-07-2025	Valid	Episode 3	16-07-2025	2
19-07-2025	Valid	Episode 3	15-07-2025	4
20-07-2025	Valid	Episode 3	14-07-2025	6
21-07-2025	Valid–dokumentasi sosial	Episode 3	23-07-2025	2
27-07-2025	Valid	Episode 4	25-07-2025	2
30-07-2025	Valid–bukti menengah	Episode 5	24-07-2025	6

Ringkasan per episode pada Tabel 2 menunjukkan intensitas termal yang berbeda. Episode 3 merupakan rangkaian paling kuat dengan suhu minimum terendah 1,10 °C dan median suhu minimum 2,48 °C. Episode 2 juga menunjukkan kondisi dingin yang konsisten dengan suhu minimum terendah 3,68 °C. Sebaliknya, kejadian 30 Juli memiliki suhu minimum udara 8,51 °C dan berstatus bukti menengah. Nilai tersebut memperlihatkan bahwa laporan frost permukaan tidak selalu identik dengan suhu udara mendekati 0 °C pada ketinggian sensor. Kristianto et al. (2026) juga menjelaskan bahwa suhu permukaan tanaman dapat lebih rendah daripada suhu udara yang diukur AWS, terutama pada malam dengan kehilangan radiasi yang kuat.

Tabel 2. Ringkasan karakteristik lima episode frost tahun 2025

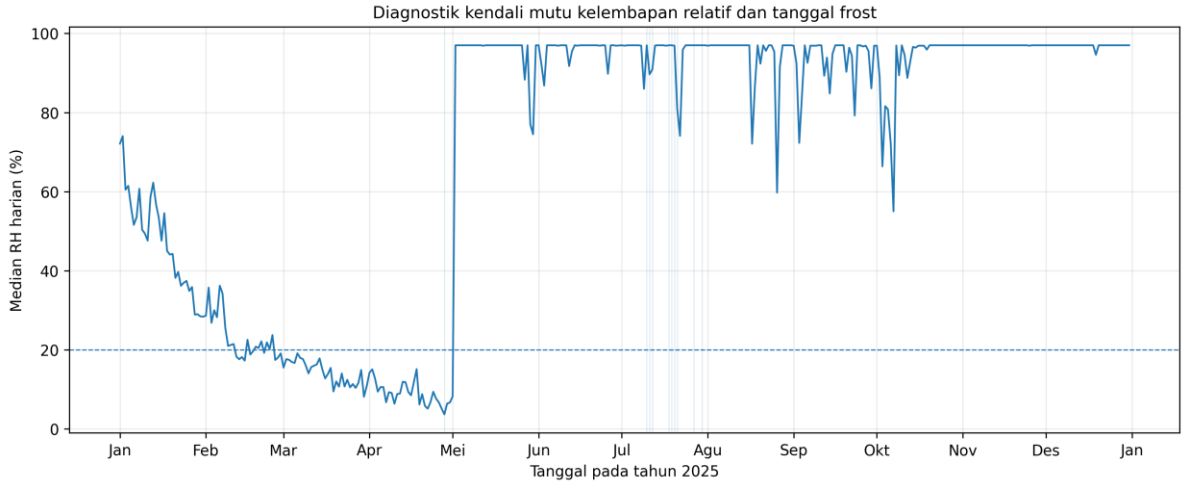
Episode	Periode	Jumlah malam	Tmin terendah (°C)	Median Tmin (°C)	Median T malam (°C)	Median angin (m s^{-1})
Episode 1	28-04-2025 s.d. 28-04-2025	1	5.99	5.99	9.56	1.31
Episode 2	10-07-2025 s.d. 12-07-2025	3	3.68	3.92	6.78	0.00
Episode 3	18-07-2025 s.d. 21-07-2025	4	1.10	2.48	5.80	0.00
Episode 4	27-07-2025 s.d. 27-07-2025	1	4.87	4.87	8.39	0.00
Episode 5	30-07-2025 s.d. 30-07-2025	1	8.51	8.51	11.92	0.31

Kelengkapan dan Kendali Mutu Data

Seri waktu tahun 2025 memiliki 52.560 waktu pengamatan yang diharapkan dan tidak ditemukan waktu yang hilang maupun tambahan. Meskipun demikian, nilai hilang pada variabel utama berkisar sekitar 1,05–1,08%. Kelengkapan sebagian besar malam frost dan kontrol mencapai

100%, tetapi malam 21 Juli hanya memiliki kelengkapan variabel inti 76,92% dan kelengkapan seluruh variabel 79,49%. Karena itu, hasil malam tersebut ditampilkan, tetapi interpretasinya diberikan secara hati-hati.

Masalah utama ditemukan pada kelembapan relatif. Median RH harian pada Januari–April turun menuju nilai yang tidak realistis, kemudian melonjak tajam mendekati 97% mulai 1 Mei. Setelah Mei, sebanyak 11 hari menunjukkan RH pada batas 97% selama sekurang-kurangnya 80% pengamatan. Pola ini menunjukkan diskontinuitas dan kemungkinan efek batas atas sensor. Nilai titik embun dan depresi titik embun yang diturunkan dari RH ikut terpengaruh. Oleh sebab itu, pasangan April dikeluarkan dari pengujian RH dan depresi titik embun, sedangkan hasil setelah Mei tetap dibahas dengan batasan bahwa sensor sering mengalami ceiling effect. Dokumentasi masalah tersebut penting karena WMO (2021) menekankan bahwa kualitas interpretasi turunan meteorologis bergantung pada mutu dan karakteristik sensor sumber.



Gambar 2. Diagnostik kendali mutu kelembapan relatif dan tanggal frost

Pola Temporal Sebelum dan Sesudah Kejadian

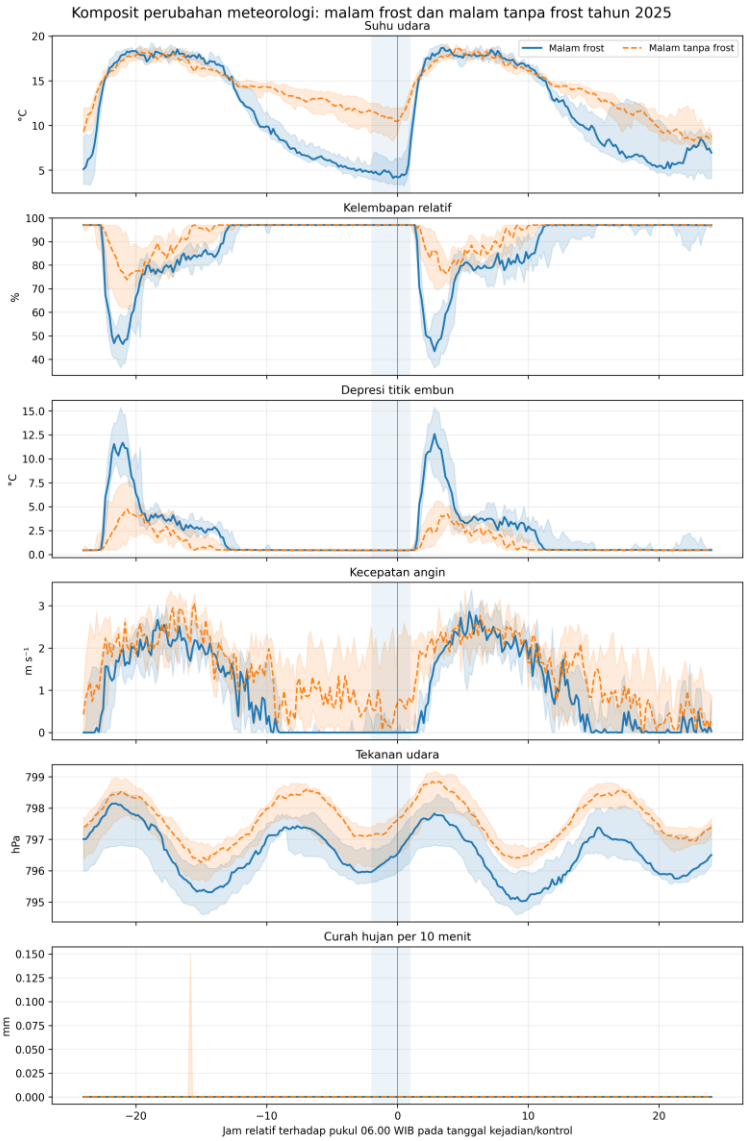
Komposit ±24 jam pada Gambar 3 menunjukkan perbedaan paling jelas pada evolusi suhu. Setelah sore hari, suhu malam frost turun lebih cepat dan tetap lebih rendah daripada malam kontrol hingga menjelang pagi. Menjelang pukul 06.00 WIB, median suhu pada kelompok frost berada sekitar 4–5 °C, sedangkan kelompok kontrol masih sekitar 10–11 °C. Setelah matahari terbit, suhu kedua kelompok meningkat cepat dan perbedaannya berkurang. Pola ini menunjukkan bahwa ciri utama frost 2025 bukan hanya nilai minimum rendah, tetapi pendinginan yang mulai terbentuk sejak sore–malam dan bertahan hingga dini hari.

Secara fisik, pola tersebut konsisten dengan pendinginan radiasi pada lapisan dekat permukaan. Ketika kehilangan energi permukaan berlangsung dalam kondisi pencampuran lemah, inversi permukaan dapat menguat dan udara dingin dapat terakumulasi di bagian topografi yang lebih rendah (Clements et al., 2003; Burns & Chemel, 2014). Kajian Rochette Cordeiro et al. (2023) menunjukkan bahwa kantong udara dingin mulai berkembang setelah matahari terbenam, bertahan sepanjang malam, dan melemah setelah pemanasan pagi. Walaupun penelitian ini hanya menggunakan satu stasiun sehingga tidak dapat memetakan aliran katabatik secara spasial, bentuk kurva suhu menunjukkan mekanisme temporal yang sejalan dengan proses tersebut.

Kecepatan angin pada kelompok frost cenderung turun menuju kondisi tenang lebih awal daripada kontrol. Median komposit mendekati 0 m s^{-1} pada sebagian besar malam hingga dini hari,

meskipun terdapat variasi antar-kejadian. Angin yang lemah mengurangi suplai udara lebih hangat dari lapisan atas dan mempertahankan lapisan stabil di dekat permukaan (Snyder & de Melo-Abreu, 2005). Komposit tekanan udara pada malam frost cenderung sedikit lebih rendah daripada kontrol, tetapi perbedaannya kecil dan tidak konsisten. Curah hujan 10 menit hampir selalu nol di sekitar waktu kejadian sehingga tidak tampak sebagai pembeda utama.

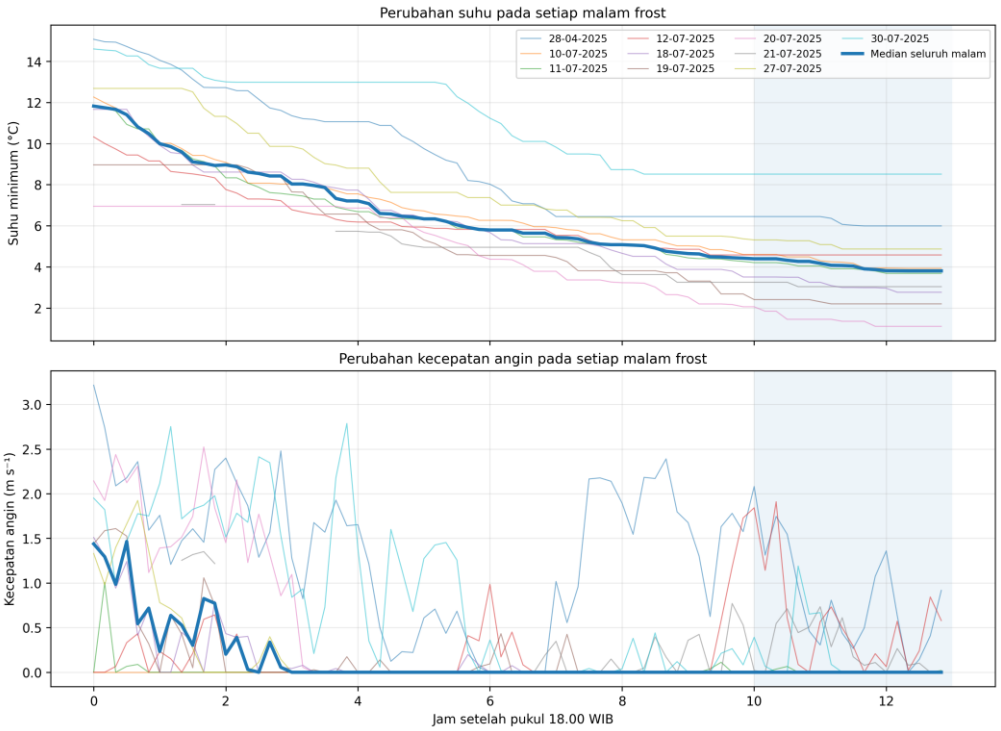
Komposit RH dan depresi titik embun memperlihatkan udara malam mendekati jenuh. Namun, garis yang sering berhenti di 97% dan depresi titik embun yang sangat kecil perlu dipahami bersama hasil kendali mutu. Karena RH mengalami efek batas atas, kedekatan suhu dan titik embun dapat terestimasi terlalu seragam. Oleh karena itu, suhu dan angin merupakan indikator observasional yang lebih dapat diandalkan dalam data 2025 dibandingkan besarnya RH absolut.



Gambar 3. Komposit perubahan meteorologi malam frost dan malam tanpa frost tahun 2025

Variabilitas Antar-Malam Frost

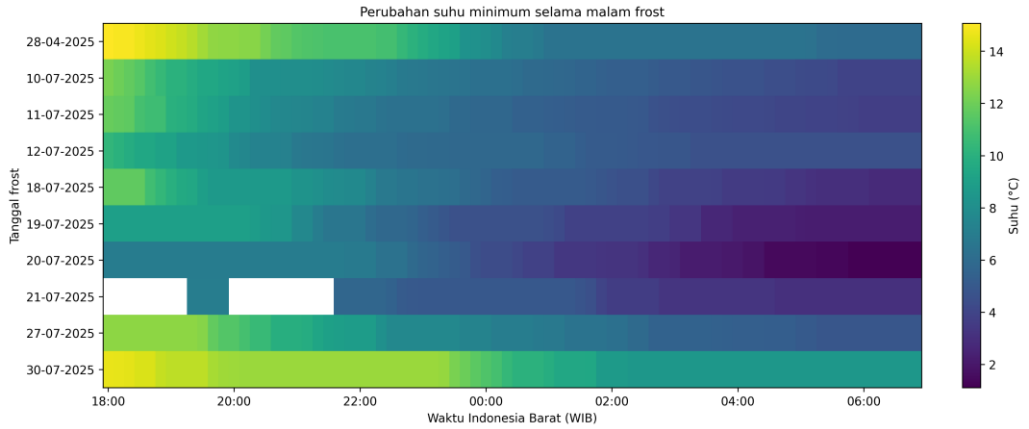
Gambar 4 memperlihatkan bahwa seluruh malam frost tidak memiliki intensitas yang sama. Median seluruh malam menunjukkan penurunan suhu dari sekitar 11,8 °C pada pukul 18.00 WIB menjadi sekitar 3,8 °C menjelang pagi. Episode 18–21 Juli memiliki pendinginan paling kuat, khususnya 20 Juli yang mencapai 1,10 °C pada pukul 05.50 WIB. Pada sebagian besar kejadian Juli, angin melemah hingga mendekati 0 m s^{-1} beberapa jam setelah pukul 18.00 WIB dan tetap rendah sampai pagi. Sebaliknya, 28 April dan 30 Juli mempertahankan suhu yang lebih tinggi dan menunjukkan angin yang lebih bervariasi.



Gambar 4. Perubahan suhu dan kecepatan angin pada setiap malam frost

Sumber: output Gambar02_suhu_dan_angin_setiap_malam_frost.png.

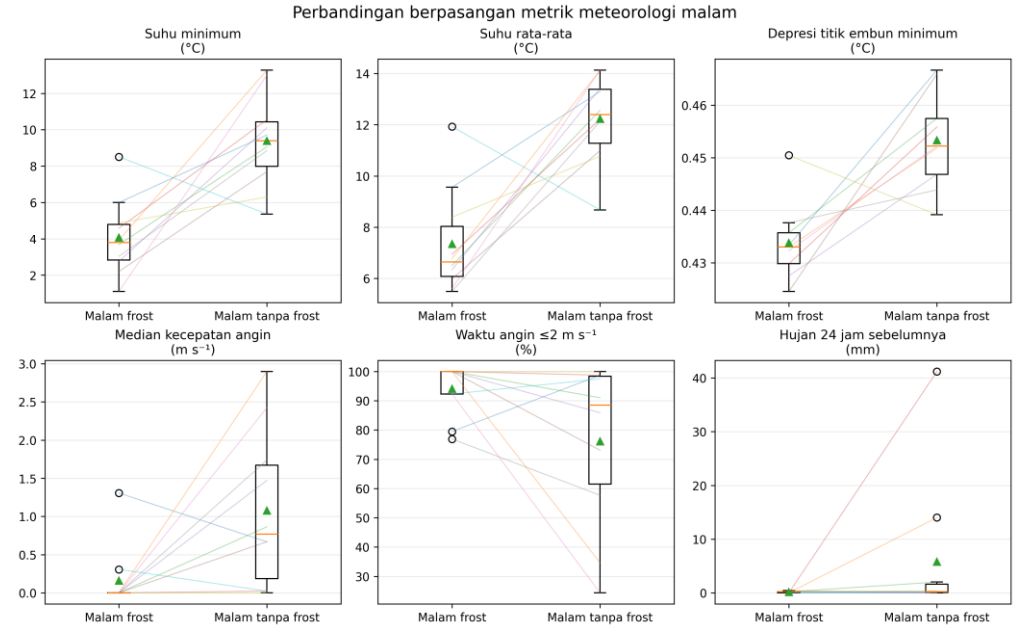
Heatmap pada Gambar 5 menegaskan bahwa pendinginan bersifat progresif. Warna yang semakin gelap muncul dari malam menuju dini hari, terutama pada 18–21 Juli. Suhu minimum umumnya tercapai antara sekitar pukul 03.00 dan 06.10 WIB. Pola ini penting untuk pengembangan kewaspadaan karena menunjukkan bahwa pengamatan laju pendinginan sejak awal malam dapat memberikan informasi lebih awal daripada hanya menunggu suhu minimum menjelang pagi. Meski demikian, kejadian 30 Juli menunjukkan bahwa frost yang dilaporkan dapat bersifat lokal atau terbatas pada permukaan tertentu sehingga satu nilai suhu udara AWS belum selalu mewakili seluruh mikrohabitat di Dieng.



Gambar 5. Perubahan suhu minimum selama malam frost

Perbandingan Statistik Malam Frost dan Malam Tanpa Frost

Perbandingan berpasangan pada Gambar 6 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa suhu merupakan unsur yang paling konsisten membedakan kedua kelompok. Median suhu minimum malam frost sebesar 3,80 °C, sedangkan kontrol sebesar 9,39 °C. Selisih median frost–kontrol mencapai −5,66 °C dan tetap signifikan setelah koreksi Benjamini–Hochberg (pFDR = 0,025; rank-biserial = −0,927). Suhu rata-rata malam menunjukkan pola hampir sama, yaitu 6,64 °C pada frost dan 12,39 °C pada kontrol (pFDR = 0,025).



Gambar 6. Perbandingan berpasangan metrik meteorologi malam

Besarnya pendinginan juga menjadi pembeda kuat. Penurunan suhu pukul 18.00–00.00 WIB mencapai median 6,34 °C pada frost dan 2,70 °C pada kontrol. Sampai pukul 06.00 WIB, penurunannya menjadi 8,53 °C pada frost dan 4,04 °C pada kontrol. Kedua metrik signifikan setelah koreksi pengujian ganda dan memiliki ukuran efek sangat besar. Hasil tersebut memperkuat

bahwa dinamika penurunan suhu sejak awal malam lebih informatif daripada hanya menggunakan satu nilai suhu pada waktu tertentu.

Depresi titik embun minimum berbeda secara statistik, yaitu 0,433 °C pada frost dan 0,452 °C pada kontrol (pFDR = 0,030). Akan tetapi, perbedaan absolutnya hanya sekitar 0,02 °C dan bergantung pada RH yang mengalami efek batas atas. Dengan demikian, signifikansi statistik ini tidak serta-merta menunjukkan signifikansi meteorologis yang besar. RH rata-rata tidak berbeda dan RH maksimum tidak dapat diuji karena hampir semua malam mencapai 97%. Temuan ini menjadi contoh bahwa kualitas sensor dan besar perbedaan harus dipertimbangkan bersama nilai p.

Angin menunjukkan kecenderungan fisik yang konsisten, tetapi bukti statistiknya lebih lemah setelah koreksi. Median kecepatan angin malam frost adalah 0 m s^{-1}, lebih rendah daripada kontrol 0,77 m s^{-1}; nilai p awal 0,039 berubah menjadi pFDR 0,085. Persentase waktu dengan angin ≤2 m s^{-1} mencapai median 100% pada frost dan 88,46% pada kontrol, tetapi belum signifikan setelah koreksi. Hal tersebut dapat disebabkan oleh jumlah pasangan yang kecil, adanya banyak nilai nol, dan beberapa malam kontrol yang juga sangat tenang. Meskipun demikian, arah perbedaan sejalan dengan karakteristik frost Dieng yang dilaporkan Kristianto et al. (2026).

Tekanan udara rata-rata, perubahan tekanan sepanjang malam, dan curah hujan 24 jam sebelumnya tidak berbeda signifikan. Median hujan 24 jam sebelum kejadian sama-sama 0,20 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa variabel tersebut tidak menjadi pemisah langsung dalam sampel 2025. Tekanan mungkin lebih merepresentasikan perubahan sinoptik atau siklus harian, sedangkan pembentukan frost di lokasi lebih dekat dikendalikan oleh keseimbangan energi permukaan, stabilitas lapisan batas, kelemahan angin, dan kondisi mikro-topografi.

Tabel 3. Perbandingan statistik malam frost dan malam tanpa frost

Metrik	n	Median frost	Median kontrol	Selisih	p FDR	Rank-biserial
Suhu minimum malam (°C)	10	3.802	9.385	-5.659	0.025	-0.927
Suhu rata-rata malam (°C)	10	6.644	12.385	-5.659	0.025	-0.927
Penurunan suhu pukul 18–00 WIB (°C)	9	6.340	2.700	4.460	0.025	0.956
Penurunan suhu pukul 18–06 WIB (°C)	9	8.529	4.040	3.515	0.025	1.000
Kelembapan relatif rata-rata (%)	9	96.983	96.986	-0.003	0.820	-0.111
Depresi titik embun minimum (°C)	9	0.433	0.452	-0.020	0.030	-0.911
Median kecepatan angin (m s^{-1})	10	0.000	0.766	-0.766	0.085	-0.778
Waktu dengan angin ≤2 m s^{-1} (%)	10	100.000	88.462	11.538	0.121	0.689
Tekanan udara rata-rata (hPa)	10	796.620	797.811	-0.960	0.279	-0.491
Curah hujan 24 jam sebelumnya (mm)	10	0.200	0.200	-0.100	0.284	-0.571

Implikasi, Keterbatasan, dan Arah Pengembangan

Hasil penelitian mendukung penggunaan kombinasi suhu minimum, laju pendinginan malam, dan kelemahan angin sebagai indikator awal kondisi pendukung frost. Pola yang paling konsisten

adalah penurunan suhu sekitar 6 °C atau lebih hingga tengah malam, pendinginan total mendekati 8 °C atau lebih hingga pagi, dan angin yang sangat lemah. Namun, angka tersebut berasal dari 10 malam tahun 2025 sehingga belum dapat diperlakukan sebagai ambang operasional. Pengembangan indikator peringatan dini harus divalidasi menggunakan beberapa tahun data dan observasi suhu permukaan atau suhu daun.

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, 10 malam berasal dari lima episode sehingga terdapat ketergantungan antar-malam berurutan. Kedua, waktu awal frost tidak diamati secara langsung; pukul 06.00 WIB hanya digunakan sebagai acuan komposit. Ketiga, status kejadian berasal dari kekuatan bukti yang tidak seragam. Keempat, satu AWS tidak dapat menggambarkan variasi mikro-topografi dan cold-air pooling di seluruh Dieng. Kelima, tidak tersedia pengamatan radiasi, tutupan awan, dan suhu permukaan. Keenam, data RH mengalami diskontinuitas sebelum Mei dan efek batas atas setelah Mei. Keterbatasan tersebut mengharuskan hasil dipahami sebagai karakterisasi studi kasus 2025, bukan klimatologi frost Dieng secara umum.

KESIMPULAN

Kejadian frost di Dataran Tinggi Dieng tahun 2025 terutama dicirikan oleh pendinginan malam yang lebih kuat dan berkelanjutan dibandingkan malam tanpa frost. Median suhu minimum malam frost sebesar 3,80 °C, jauh lebih rendah daripada kontrol sebesar 9,39 °C, sedangkan median penurunan suhu pukul 18.00–06.00 WIB mencapai 8,53 °C pada frost dan 4,04 °C pada kontrol. Suhu minimum, suhu rata-rata malam, serta penurunan suhu hingga tengah malam dan pagi menunjukkan perbedaan signifikan dengan ukuran efek sangat besar. Angin pada malam frost cenderung lebih lemah dan lebih sering berada di bawah 2 m s^{-1}, walaupun perbedaannya tidak lagi signifikan setelah koreksi pengujian ganda. Depresi titik embun minimum berbeda secara statistik, tetapi interpretasinya dibatasi oleh efek batas atas sensor kelembapan. Tekanan udara dan curah hujan sebelumnya tidak menjadi pembeda utama. Dengan demikian, suhu dan evolusi pendinginan malam merupakan unsur paling dominan pada sampel 2025. Penelitian lanjutan perlu menggunakan periode yang lebih panjang, observasi suhu permukaan, radiasi, tutupan awan, dan jaringan stasiun yang lebih rapat untuk menyusun indikator peringatan dini frost yang tervalidasi.

DAFTAR REFERENSI

Aini, E. N., & Faqih, A. (2021). Frost predictions in Dieng using the outputs of Subseasonal to Seasonal (S2S) model. Agromet, 35(1), 30–38. doi:10.29244/j.agromet.35.1.30-38

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 57(1), 289–300. doi:10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

Burns, P., & Chemel, C. (2014). Evolution of cold-air-pooling processes in complex terrain. Boundary-Layer Meteorology, 150(3), 423–447. doi:10.1007/s10546-013-9885-z

Clements, C. B., Whiteman, C. D., & Horel, J. D. (2003). Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah. Journal of Applied Meteorology, 42(6), 752–768. doi:10.1175/1520-0450(2003)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2

Jufri, R. A., Nugroho, H. A., Kristianto, A., Septiadi, D., Virgianto, R. H., Nugraheini, I. R., & Soegiarto, I. (2024). Rancangan dan implementasi sistem monitoring bencana frost (embun beku). ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 12(2), 288–302. doi:10.26760/elkomika.v12i2.288

Kristianto, A., Nugraheni, I. R., Virgianto, R. H., Septiadi, D., Nugroho, H. A., Soegiarto, I., Fadhilah, M. J., Wahyudi, T., & Jufri, R. A. (2026). Assessment of frost events on the tropical

highlands: Analyzing meteorological conditions and WRF-ARW model performance on the Dieng Plateau, Indonesia. MAUSAM, 77(1), 235–246. doi:10.54302/9qqwq735

Pradana, A., Mardiana, A., Lestari, F. N., Sara, F. H., Afifah, S., & Nurjani, E. (2018). Frost hazard assessment on agricultural land to achieve resilient agriculture in Dieng Volcanic Highland, Central Java. Ilmu Pertanian (Agricultural Science), 3(1), 46–56. doi:10.22146/ipas.39620

Rochette Cordeiro, A. M., Ornelas, A., & Silva, D. D. (2023). The importance of topography in the formation of cold-air pooling in urban spaces: The example of the city of Coimbra (Portugal). Theoretical and Applied Climatology, 152, 227–239. doi:10.1007/s00704-023-04401-8

Snyder, R. L., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection: Fundamentals, practice and economics. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. Biometrics Bulletin, 1(6), 80–83. doi:10.2307/3001968

World Meteorological Organization. (2021). Guide to instruments and methods of observation (WMO-No. 8). Geneva, Switzerland: Author.