Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan Volume 18, Number 2, June 2026 Hal. **130-144**
p-ISSN:2085-1227 dan e-ISSN:2502-6119

ANALISIS PERFORMA INDEKS STABILITAS TERMODINAMIK RADIOSONDE DALAM MEMPREDIKSI KEJADIAN THUNDERSTORM DI BANDAR UDARA JUANDA

Rayhan Rafi[1], Yusron Faiz Athallah[1], Yosafat Donni Haryanto[1*]
[1] Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
*Korespondensi: yosafat.haryanto@stmkg.ac.id

Abstrak

Keselamatan operasional penerbangan di Bandar Udara Internasional Juanda sangat bergantung pada akurasi prediksi cuaca jangka pendek (*nowcasting*), khususnya dalam mengantisipasi fenomena cuaca konvektif signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa enam indeks stabilitas termodinamik (*CAPE, K-Index, Lifted Index, Total-Totals, Showalter Index,* dan *SWEAT*) yang diperoleh dari data Radiosonde jam 00.00 UTC dalam memprediksi kejadian Badai Guntur (*Thunderstorm*) pada rentang waktu 00.00–06.00 UTC. Menggunakan data observasi periode September 2024 hingga Agustus 2025, metode verifikasi dilakukan melalui analisis distribusi visual (*Box Plot*) dan perhitungan skor statistik tabel kontingensi (*POD, FAR, CSI*). Hasil analisis musiman menunjukkan bahwa indeks stabilitas memiliki respons yang lebih sensitif pada Musim Hujan (DJF) dibandingkan Musim Kemarau (JJA), sejalan dengan tingginya frekuensi kejadian konvektif pada periode tersebut. Secara kuantitatif, parameter Lifted Index (LI) tercatat memiliki performa validasi relatif terbaik dengan skor *Critical Success Index* (CSI) tertinggi dibandingkan indeks lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter stabilitas berbasis perbedaan suhu parsel udara lebih representatif untuk kondisi atmosfer lokal dibandingkan parameter energi murni seperti CAPE. Namun, nilai CSI yang secara umum masih rendah (< 0.2) mengindikasikan bahwa indeks-indeks tersebut memiliki keterbatasan sensitivitas dalam merespons dinamika atmosfer lokal di Juanda, ditandai dengan tingkat kejadian *Misses* atau peringatan palsu *False Alarm* yang masih cukup tinggi. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan LI sebagai prioritas, namun perlu dikaji lebih lanjut mengenai penyesuaian kriteria lokal dan penggunaan skala temporal penelitian yang lebih lama untuk meningkatkan akurasi performa.

Kata kunci: Radiosonde, badai petir, stabilitas, atmosfer

Abstract

Operational flight safety at Juanda International Airport relies heavily on the accuracy of short-term weather predictions (nowcasting), particularly in anticipating significant convective weather phenomena. This study aims to evaluate the performance of six thermodynamic instability indices (CAPE, K-Index, Lifted Index, Total-Totals, Showalter Index, and SWEAT) derived from 00.00 UTC radiosonde data in predicting Thunderstorm events occurring between 00.00–06.00 UTC. Using observational data from September 2024 to August 2025, verification was conducted through visual distribution analysis (Box Plot) and statistical contingency table scores (POD, FAR, CSI). Seasonal analysis shows that instability indices exhibit higher sensitivity during the Rainy Season (DJF) compared to the Dry Season (JJA), consistent with the greater frequency of convective events in that period. Quantitatively, the Lifted Index (LI) demonstrates relatively superior validation performance, indicated by the highest Critical Success Index (CSI) among all indices. This suggests that stability parameters based on parcel temperature differences are more representative of local atmospheric conditions than purely energy-based parameters such as CAPE. However, the generally low CSI values (< 0.2) indicate that these indices still have limited sensitivity in capturing local atmospheric dynamics at Juanda, as reflected by the relatively high occurrences of Misses and False Alarms. This study recommends prioritizing the use of LI, while further investigation on local threshold adjustments and extending the temporal scale of analysis is necessary to improve predictive performance.

Keywords: *Radiosonde, thunderstorm, instability, atmosphere*

P-ISSN: 2085-1227 I E-ISSN: 2502-6119
Copyright © 2026 Authors. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0) (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

1. PENDAHULUAN

Keselamatan operasional penerbangan merupakan prioritas utama dalam industri aviasi demi kelancaran lalu lintas penerbangan (Winaya & ALW., 2016). Salah satu tantangan terbesar dalam operasional bandar udara adalah gangguan cuaca, terutama fenomena cuaca konvektif (Lubis et al., 2020). Badai guntur (*Thunderstorm*) merupakan fenomena signifikan yang diakibatkan langsung oleh awan *Cumulonimbus* (Cb) yang dapat mengganggu penerbangan dan menimbulkan risiko keselamatan serius (Kurnia et al., 2018). Oleh karena itu, kemampuan untuk memprediksi kejadian badai guntur dalam jangka pendek sangat krusial bagi prakirawan cuaca untuk mengantisipasi berbagai kemungkinan terburuk dalam penerbangan (Zahroh et al., 2017).

Informasi mengenai cuaca signifikan sangat vital untuk penerbangan karena dapat mengganggu aktivitas dan lalu lintas udara (Akhirta et al., 2023). Fenomena *Thunderstorm* pada penerbangan harus dilaporkan dalam *aerodrome warning* untuk mendukung keselamatan penerbangan (BMKG, 2015). Hal ini menjadi landasan pelayanan meteorologi penerbangan berstandar internasional dari Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) bagi Bandar Udara (Rizki, 2012).

Bandar Udara Juanda di Surabaya merupakan salah satu bandar udara tersibuk di Indonesia setelah Bandar Udara Internasional Soekarno Hatta, yang terletak di wilayah pesisir dengan iklim tropis maritim (Azizah, 2022). Karakteristik ini membuatnya sangat rentan terhadap pembentukan awan konvektif harian yang intensif, terutama selama periode musim hujan DJF (Desember-Januari-Februari) (Anggoro & Ananti, 2023). Untuk mendeteksi dan mengantisipasi potensi cuaca signifikan lebih dini, prakirawan cuaca mengandalkan pengamatan *sounding* seperti Radiosonde (Zahroh et al., 2017).

Radiosonde adalah instrumen yang diterbangkan menggunakan balon untuk memantau kondisi dinamika atmosfer. Berdasarkan standar operasional dalam Perka BMG (BMG, 2006), pengamatan udara atas ini dilakukan menggunakan sensor *transmitter* elektronik yang dibawa oleh balon berbobot 500 atau 600 gram. Pelepasan dilakukan dua kali sehari, yaitu pada pukul 00.00 UTC (07.00 WIB) dan 12.00 UTC (19.00 WIB). Dalam penyajian datanya, Radiosonde diproyeksikan sebagai grafik termodinamika yang memuat tiga blok data numerik, lima jenis skala, dan lima kelompok kurva. Kurva-kurva tersebut meliputi tekanan, suhu, *dry adiabatic*, *saturation adiabatic*, serta rasio pencampuran atau *mixing ratio* (Stipanuk, 1973).

Data Radiosonde menghasilkan berbagai parameter termodinamik yang dikenal sebagai Indeks Stabilitas Atmosfer. Beberapa indeks stabilitas yang mendukung terjadinya *Thunderstorm* (TS) antara lain adalah CAPE (*Convective Available Potential Energy*), K Index (KI), Lifted Index

(LI), Total-Totals Index (TT), Showalter Index (SI), dan SWEAT Index (NWS, 2022). Nilai ambang batas kriteria indeks stabilitas atmosfer yang digunakan di wilayah Indonesia untuk ambang batas indeks stabilitas atmosfer ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai Ambang Batas Indeks Stabilitas Atmosfer di Indonesia

	Potensi Konveksi		
Indeks stabilitas	lemah	sedang	kuat
Showalter index	> 4	4 s/d -4	< (-4)
Lifted Index	> -2	-2 s/d -6	< -6
K index	< 29	29 s/d 37	> 37
Total-totals Index	< 42	42 s/d 46	> 46
SWEAT	<135	135 s/d 239	> 329
CAPE	< 1000	1000 s/d 2500	> 2500

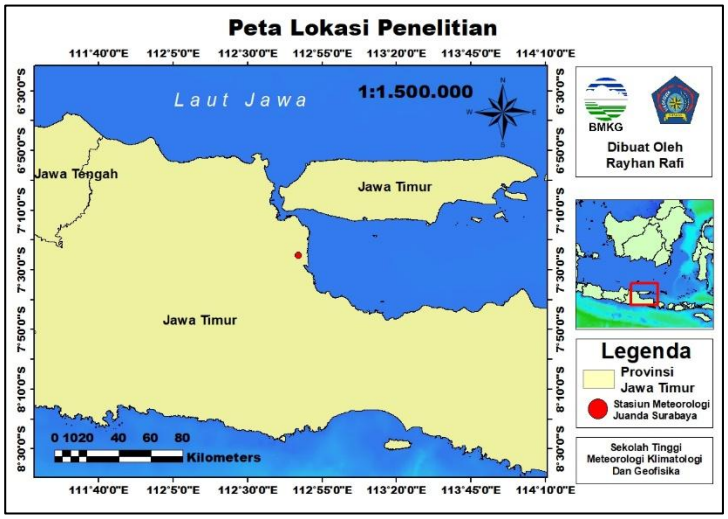
Sumber : Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2014), Prasetyo et al. (2020), Fibriantika dan Mayangwulan (2020), dan Kusumawardani dan Azani (2022)

Tabel 1 berfungsi sebagai rujukan utama terkait standar nilai ambang batas (*threshold*) dari keenam indeks stabilitas termodinamik yang diterapkan di wilayah Indonesia. Nilai-nilai klasifikasi ini merupakan hasil rumusan dan sintesis dari berbagai penelitian terdahulu yang telah disesuaikan dengan karakteristik atmosfer tropis atau Indonesia. Keberadaan ambang batas ini sangat krusial dalam operasional meteorologi karena digunakan sebagai parameter dasar untuk mengategorikan tingkat ketidakstabilan atmosfer, mulai dari potensi konveksi lemah, sedang, hingga kuat. Dengan mengacu pada ambang batas tersebut, prakirawan cuaca dapat menginterpretasikan data Radiosonde secara lebih objektif untuk menilai seberapa besar peluang pembentukan awan *Cumulonimbus* dan memprediksi potensi terjadinya fenomena *Thunderstorm*.

Penelitian ini merujuk pada berbagai penelitian terdahulu seperti Yavu (2024) yang melakukan analisis performa indeks termodinamik untuk memprediksi kejadian *Thunderstorm* (TS). Studi tersebut merumuskan ambang batas (*threshold*) stabilitas atmosfer terbaru khusus di Istanbul dengan referensi ambang batas internasional (NWS, 2022). Studi lain juga dilakukan oleh Kolay et al. (2025) di mana mengevaluasi kinerja indeks stabilitas pada bandara Istanbul di mana *K Index* dan *Total Totals Index* merupakan indeks yang paling efektif dalam memprediksi *thunderstrom*. Mengingat perbedaan karakteristik kelembapan atmosfer antara wilayah subtropis (Turki) dan tropis (Indonesia) di mana secara umum wilayah subtropis cenderung

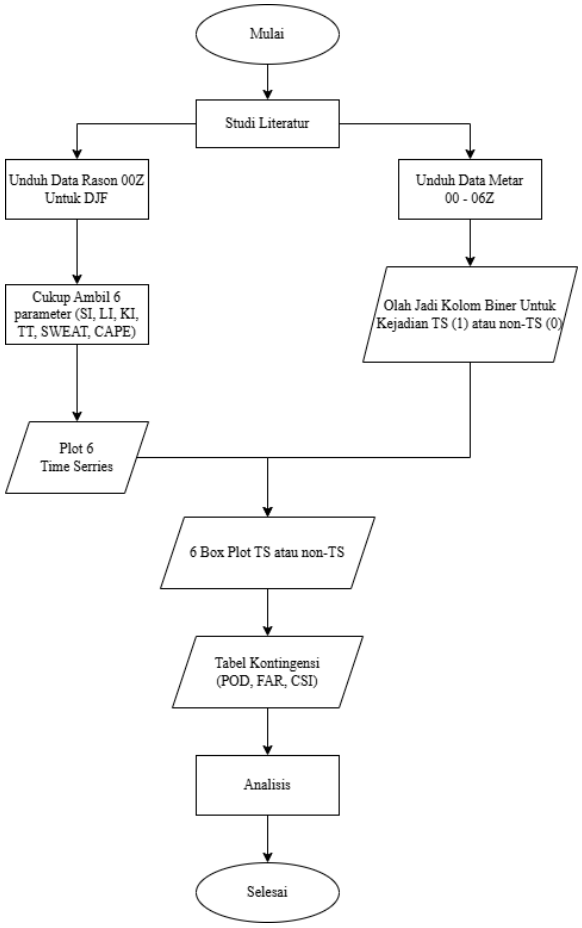
lebih kering dibandingkan wilayah tropis yang cenderung basah (Cau et al., 2007), maka jika menggunakan ambang batas internasional dikhawatirkan akan memiliki banyak f*alse alarm.* Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis performa komparatif dari enam indeks stabilitas termodinamik yang berasal dari data Radiosonde 00Z. Performa setiap indeks akan divalidasi secara kuantitatif terhadap data observasi kejadian badai guntur (*Thunderstorm*) dari laporan METAR (00-06Z) di Bandar Udara Juanda selama periode DJF 2024-2025. Dengan menggunakan skor verifikasi kategorikal (POD, FAR, dan CSI), penelitian ini akan menentukan indeks stabilitas mana yang paling andal dan berkinerja terbaik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi objektif berbasis data bagi prakirawan cuaca di Bandar Udara Juanda untuk meningkatkan akurasi prediksi cuaca jangka pendek demi keselamatan penerbangan.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah kerja Stasiun Meteorologi Kelas I Juanda, Surabaya, yang terletak di Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Secara geografis, lokasi titik pengamatan Stasiun Meteorologi Juanda berada pada koordinat sekitar 7°22' Lintang Selatan dan 112°46' Bujur Timur dengan elevasi rendah (dataran rendah pesisir). Lokasi penelitian ini dipilih karena Bandar Udara Internasional Juanda merupakan bandar udara dengan lalu lintas penerbangan terpadat kedua di Indonesia, sehingga informasi cuaca signifikan sangat krusial bagi keselamatan penerbangan.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Secara umum, prosedur penelitian ditampilkan pada gambar 2 dimana alurnya terbagi menjadi enam tahapan. Pertama, dilakukan pengunduhan data Radiosonde selama periode musim hujan (DJF 2024-2025) melalui situs https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html untuk mendapatkan nilai enam parameter stabilitas, yakni CAPE (*Convective Available Potential Energy*), K Index (KI), Lifted Index (LI), Total-Totals Index (TT), Showalter Index (SI), dan SWEAT Index. Kedua, dilakukan seleksi kejadian cuaca signifikan pada rentang waktu 00–06 UTC melalui situs https://web-aviation.bmkg.go.id/web/metar_speci.php selama periode penelitian, yakni 1 tahun. Merujuk pada (Yavuz, 2024), klasifikasi kejadian difokuskan pada seluruh data yang memuat kode "TS" (termasuk "TSRA"), sedangkan kode "RA" tanpa kilat tidak diperhitungkan. Langkah ketiga adalah pembuatan plot *time series* dari keenam parameter untuk mengamati pola fluktuasi stabilitas atmosfer. Langkah keempat melibatkan analisis komparatif antara kejadian TS dan non-TS menggunakan visualisasi *box plot* secara musiman (SON, DJF, MMA, JJA) dan tahunan untuk mengetahui distribusi nilai indeks stabilitas antara hari terjadi *Thunderstorm* dan hari tidak terjadi *Thunderstrom*.

Tabel 2. Konversi Ambang Batas Indeks Stabilitas Atmosfer

Indeks stabilitas	Potensi Konveksi	
	No TS	TS
Showalter index	> 4	≤ 4
Lifted Index	> -2	≤ -2
K index	< 29	≥ 29
Total-totals Index	< 42	≥ 42
SWEAT	<135	≥ 135
CAPE	< 1000	≥ 1000

Tabel 3. Nilai Kontingensi Pengamatan dan Prakiraan TS

Elemen	Forecast Radiosonde	Observasi METAR	Definisi
A	Iya	Terjadi	Prakiraan dan Observasi benar
B	Iya	Tidak Terjadi	Prakiraan salah namun Terjadi TS
C	Tidak	Terjadi	Prakiraan Benar, Tidak Terjadi TS
D	Tidak	Tidak Terjadi	Prakiraan dan Observasi Tidak Terjadi TS

Sumber : Yavus (2024)

Tabel 4. Informasi Nilai Kontingensi

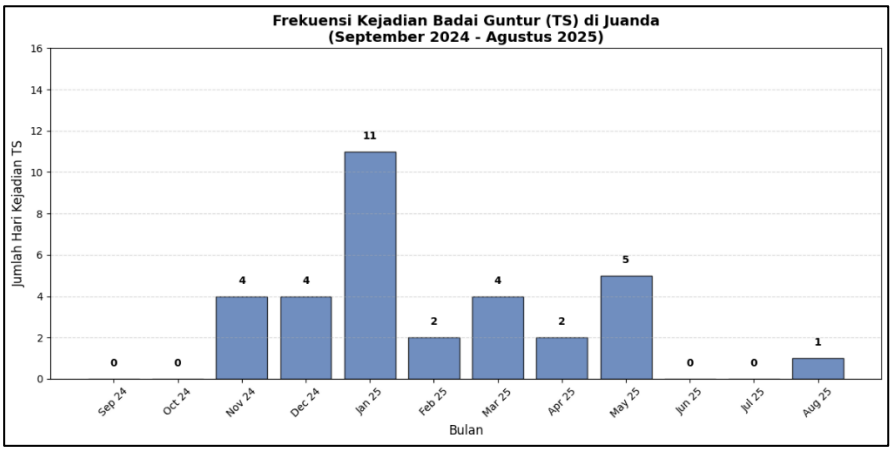
Simbol	Keterangan	Formula
POD	Probability of detection	POD = A/(A + B)
FAR	False alarm ratio	FAR = C/(A + C)
CSI	Critical success index	CSI = A/(A + B + C)

Sumber : Yavus (2024)

Langkah kelima mencakup penyusunan tabel kontingensi untuk menghitung skor *probability of detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), dan *critical success index* (CSI) dengan penentuan optimasi ambang batas indeks stabilitas atmosfer guna membagi data menjadi 2 kategori (*yes or no*) pada tabel 2. Sedangkan tabel 3&4 menjelaskan bagaimana pengamatan prakiraan TS dapat dinilai secara statistik dengan kondisi sebenarnya (pengamatan) melalui kontingensi pengamatan POD, FAR, dan CSI. Langkah diakhiri dengan analisis untuk menentukan indeks stabilitas mana yang memiliki performa prediksi terbaik berdasarkan musiman ataupun tahunan selama periode September 2024 hingga Agustus 2025. Adapun penentuan pengunaan data rentan satu tahun karena sudah mewakili siklus variabilitas musiman secara utuh, baik kemarau ataupun hujan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

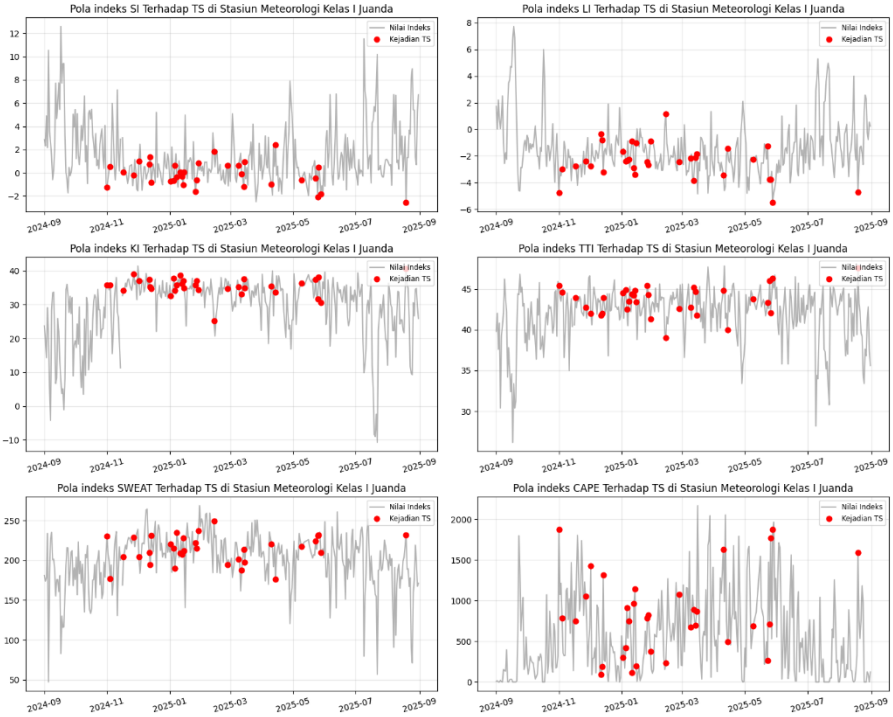
3.1. FREKUENSI THUNDERSTORM



Gambar 3. Frekuensi Terjadinya *Thunderstorm* Pada Periode September 2024 – Agustus 2025

Berdasarkan Gambar 3, analisis temporal menunjukkan bahwa kejadian badai guntur (*Thunderstorm*) di Bandar Udara Juanda selama periode September 2024 hingga Agustus 2025 memiliki pola musiman yang sangat signifikan. Puncak aktivitas konvektif terjadi pada bulan Januari 2025 dengan 11 kejadian, dan secara akumulatif mendominasi pada periode musim hujan (DJF) dengan total 17 kejadian. Sebaliknya, frekuensi ini menurun drastis memasuki masa peralihan hingga mencapai titik terendah (nol kejadian) pada puncak musim kemarau (Juni-Juli). Pola frekuensi musiman ini sangat sejalan dengan fluktuasi parameter labilitas termodinamika atmosfer. Pada periode musim hujan (DJF), melimpahnya uap air dan tingginya pemanasan memicu energi potensial konvektif yang besar, sehingga atmosfer berada dalam kondisi sangat labil. Hal ini tercermin dari tingginya nilai *Convective Available Potential Energy* (CAPE) dan K-Index (KI), serta nilai *Lifted Index* (LI) maupun *Showalter Index* (SI) yang bergerak tajam menuju angka negatif. Kombinasi kondisi termodinamika yang sangat labil ini mendukung pertumbuhan awan *Cumulonimbus* (Cb) secara masif. Sebaliknya, pada musim kemarau (JJA), intrusi massa udara yang lebih kering meminimalisir energi konvektif dan membuat atmosfer menjadi lebih stabil, sehingga pembentukan awan badai guntur tertekan secara drastis.

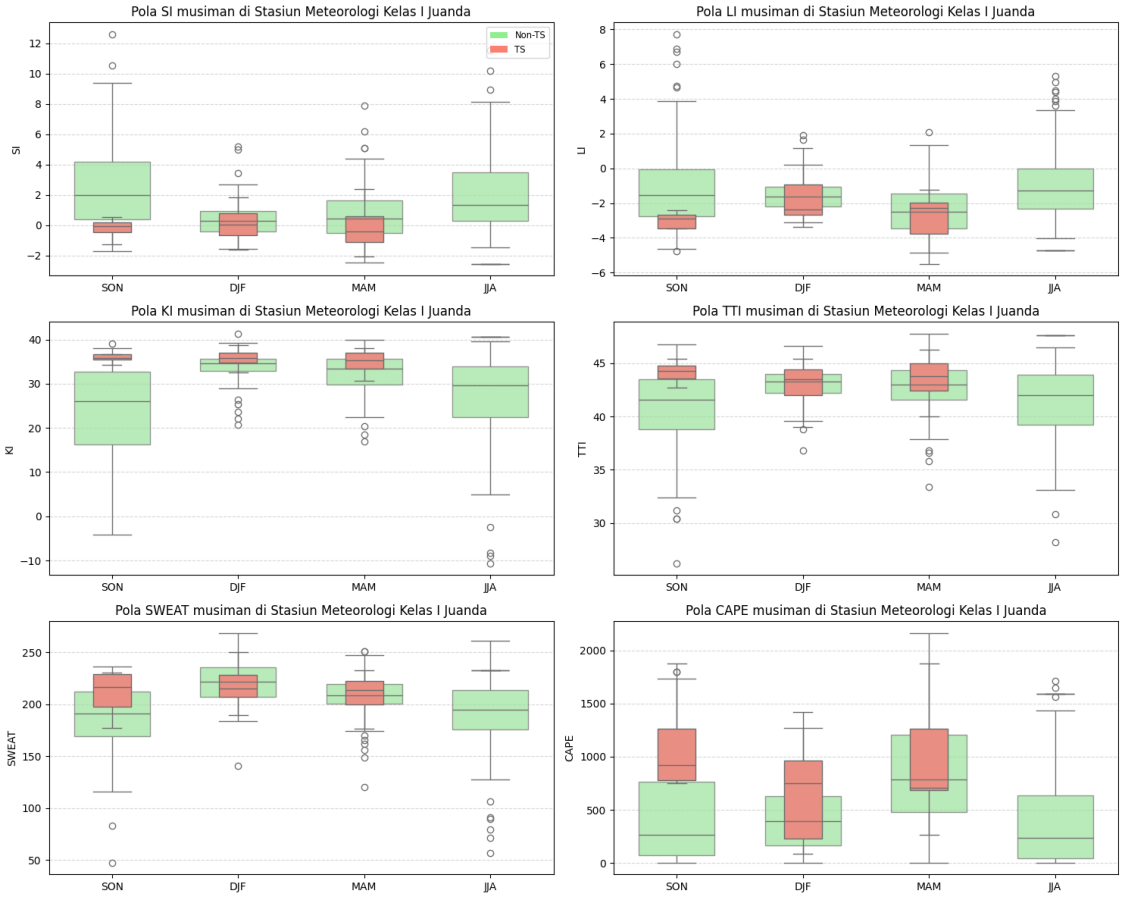
3.2. DISTRIBUSI INDEKS STABILITAS TERMODINAMIK SELAMA KEJADIAN THUNDERSTORM



Gambar 4. Diagram *Time Series* Hubungan Antara Indeks Stabilitas Terhadap Kejadian *Thunderstorm*

Analisis visual *time series* pada gambar 4 menunjukkan hubungan yang kuat antara fluktuasi harian indeks stabilitas termodinamik dengan kejadian *Thunderstorm* (TS), di mana titik-titik kejadian TS terkonsentrasi pada periode musim hujan dengan pola nilai yang khas. Parameter CAPE, K-Index (KI), Total-Totals (TTI), dan SWEAT memperlihatkan korelasi positif, di mana kejadian TS secara konsisten muncul bertepatan dengan lonjakan grafik yang mengindikasikan tingginya energi konvektif dan kelembapan. Sebaliknya, parameter Showalter Index (SI) dan Lifted Index (LI) menunjukkan pola invers, di mana kejadian TS berasosiasi kuat dengan penurunan nilai indeks secara tajam menuju angka negatif (*valleys*). Pola ini menegaskan bahwa keenam parameter tersebut responsif terhadap perubahan dinamika atmosfer lokal saat terjadi cuaca buruk, meskipun sensitivitas fluktuasinya bervariasi antar indeks. Untuk menganalisis performa setiap indeks, perlu dilakukan perhitungan statistik untuk mengasilkan perhitungan performa indeks stabilitas secara obyektif.

3.3. PERFORMA INDEKS STABILITAS TERHADAP KEJADIAN THUNDERSTORM



Gambar 5. Diagram Box Plot Performa Indeks Stabilitas Terhadap Kejadian TS Pada Periode musiman (SON, DJF, MMA, JJA)

Performa enam indeks stabilitas termodinamik pada gambar 5 memperlihatkan bahwa akurasi deteksi sangat dipengaruhi oleh pola musim, di mana Musim Hujan (DJF) menjadi periode dengan kinerja terbaik. Berdasarkan visualisasi *Box Plot*, pada periode DJF terlihat pemisah yang paling jelas antara distribusi hari kejadian *Thunderstorm* (TS) dan Non-TS, khususnya pada parameter CAPE dan KI. Pada periode ini, nilai median CAPE saat kejadian TS melonjak signifikan dibandingkan hari biasa, yang mengindikasikan ketersediaan energi konvektif yang melimpah. Pola serupa namun berlawanan arah (*invers*) ditunjukkan oleh parameter Showalter Index (SI) dan Lifted Index (LI), di mana kotak distribusi kejadian TS bergerak turun secara tajam menuju nilai negatif, menandakan ketidakstabilan atmosfer yang kuat.

Memasuki musim peralihan, baik Maret-Mei (MAM) maupun September-November (SON), pola separasi pada grafik mulai menyempit meskipun masih dapat teridentifikasi. Pada periode peralihan ini, parameter K-Index (KI) dan Total-Totals (TTI) masih menunjukkan perbedaan

median yang cukup terlihat antara kondisi cuaca buruk dan cerah. Namun, parameter SWEAT mulai menunjukkan area tumpang tindih yang lebih besar antara kotak TS dan Non-TS. Hal ini mengindikasikan bahwa pada masa transisi musim, pemicu kejadian badai guntur menjadi lebih kompleks.

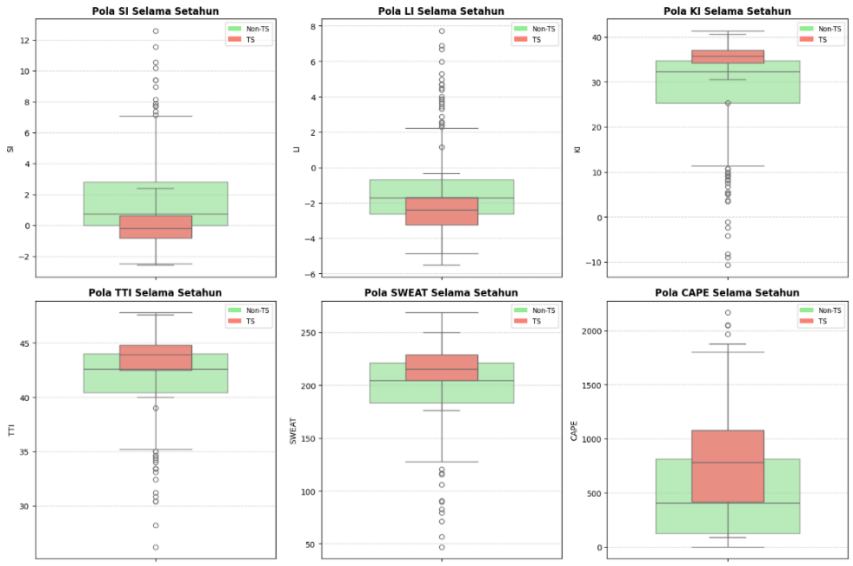
Sebaliknya, performa indeks stabilitas mengalami penurunan paling drastis pada puncak Musim Kemarau (JJA). Visualisasi data memperlihatkan *overlap* yang sangat dominan pada hampir seluruh parameter, di mana nilai median indeks pada hari kejadian TS tidak berbeda jauh dengan hari Non-TS. Bahkan, seringkali ditemukan nilai indeks yang tinggi namun tidak diikuti oleh kejadian hujan (*False Alarm* tinggi), atau sebaliknya.

Tabel 5. Skor Kontingensi Musiman Prediktor TS

Musim	Parameter Matriks Kontingensi	SI	LI	KI	TTI	SWEAT	CAPE
SON	CSI	0.620	0.103	0.105	0.093	0.049	1.095
	FAR	0.938	0.897	0.895	0.907	0.951	0.895
	POD	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500
DJF	CSI	0.195	0.233	0.190	0.187	0.191	0.190
	FAR	0.805	0.722	0.807	0.806	0.809	0.500
	POD	1.000	0.588	0.941	0.824	1.000	0.235
MAM	CSI	0.145	0.138	0.162	0.143	0.136	0.770
	FAR	0.855	0.855	0.838	0.852	0.864	0.903
	POD	1.000	0.727	1.000	0.818	1.000	0.272
JJA	CSI	0.014	0.034	0.020	0.021	0.012	0.091
	FAR	0.986	0.966	0.980	0.979	0.988	0.909
	POD	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Hal ini dikonfirmasi oleh Tabel Skor Validasi Musiman, di mana nilai *Critical Success Index* (CSI) dan *Probability of Detection* (POD) mencapai puncaknya pada bulan DJF. Sebaliknya, pada musim kemarau (JJA), performa indeks menurun drastis, bahkan mendekati nol untuk beberapa parameter akibat minimnya kejadian pembentukan awan konvektif dan TS, sehingga indeks stabilitas sering memberikan sinyal *False Alarm* (nilai indeks tinggi namun tidak terjadi TS). Jika dilihat melalui matriks CSI, Indeks terbaik untuk musim SON adalah KI (0.105), DJF adalah LI (0. 233), MAM adalah KI (0.162), dan JJA adalah CAPE (0.091).

3.4. PERFORMA INDEKS STABILITAS TERHADAP KEJADIAN THUNDERSTORM SECARA UMUM (SATU TAHUN PENUH)



Gambar 6. Diagram Box Plot Performa Indeks Stabilitas Terhadap Kejadian TS Pada Periode setahun (1 September 2024 – 31 Agustus 2025)

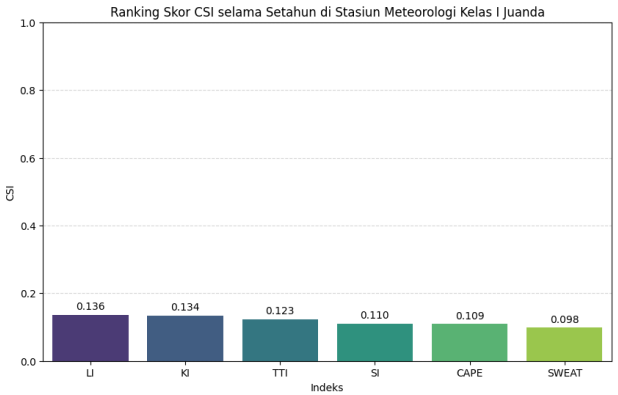
Tabel 6. Skor Kontingensi Prediktor TS Satu Tahun

Indeks	Hits	Misses	False Alarm	POD	FAR	CSI
LI	23	10	136	0.697	0.855	0.136
KI	32	1	206	0.970	0.866	0.134
TTI	28	5	195	0.848	0.874	0.123
SI	33	0	266	1000	0.890	0.110
CAPE	10	23	59	0.303	0.855	0.109
SWEAT	33	0	303	1000	0.902	0.098

Berdasarkan Box Plot Performa Indeks Stabilitas terhadap kejadian TS pada periode setahun, menunjukkan perbedaan distribusi nilai antara kondisi ketika terjadi TS dan ketika tidak terjadi. Diagram Box Plot menunjukkan bahwa sebagian besar kejadian TS memang cenderung berada pada rentang nilai yang sesuai dengan ambang batas indeks stabilitas yang telah ditentukan. Pada indeks seperti SI dan LI, nilai TS pada Box Plot didominasi oleh rentang yang labil (SI <4 dan LI <-2) sejalan dengan kondisi atmosfer yang mendukung terjadinya konveksi kuat. Hal yang sama juga terlihat pada indeks TTI dan SWEAT, dimana nilai TS cederung berada di atas ambang batas masing-masing dimana atmosfer dikatakan labil (TTI >42 dan SWEAT >135). Namun terdapat overlap cukup besar antara TS dan Non-TS pada beberapa indeks, seperti KI dan SWEAT, yang mengindikasikan bahwa atmosfer yang terlihat labil tidak selalu menyebabkan TS pada kenyataannya.

Sementara itu, indeks CAPE menunjukkan sedikit perbedaan dari indeks lainnya. Pada diagram boxplot terlihat bahwa tidak ada non-TS yang melebihi ambang batas (>1000), sehingga hanya kejadian TS yang benar-benar masuk ke rentang CAPE tinggi tersebut, yang berarti parameter CAPE cukup baik dalam membendakan kondisi TS dan Non-TS tanpa overlap di sisi nilai ekstrem. Namun, meskipun *threshold* ini terlihat efektif secara visual, nilai tabel kontingensi justru menunjukkan bahwa POD CAPE bernilai rendah yaitu hanya 0.303. hal tersebut berarti bahwa meskipun CAPE >1000 merupakan indikator kuat untuk TS, namun sebagian TS lainnya dalam setahun tersebut ternyata memiliki CAPE <1000, sehingga banyak TS yang tidak terdeteksi jika menggunakan ambang batas tersebut. Hal ini yang menjelaskan mengapa pada FAR bernilai tinggi dan CSI bernilai rendah, meskipun boxplotnya terlihat memiliki pemisahan kategori yang baik.

Menurut tabel skor kontingensi, nilai Hits, Misses, dan False Alarm memberikan gambaran nyata tentang kemampuan masing-masing indeks dalam memprediksi TS selama satu tahun. Indeks seperti SI dan SWEAT memiliki jumlah Hits tertinggi (33 kasus). Hal itu menunjukkan bahwa keduanya sangat sensitif dalam menangkap kondisi labil saat TS benar-benar terjadi. Namun, tingginya sensitivitas ini tidak diimbangi dengan ketepatan karena keduanya juga menghasilkan jumlah false alarm yang besar (SI = 266 dan SWEAT = 303), menandakan banyak kondisi yang diprediksi sebagai TS tetapi tidak terjadi pada kenyataannya. Indeks lainnya seperti KI dan TTI juga memperlihatkan karakteristik serupa, yakni Hits nya tinggi namun dengan False alarm yang tinggi juga, menunjukkan bahwa atmosfer tropis sering tampak labil menurut ambang batasnya meskipun hal tersebut tidak memicu terjadinya TS. Sementara itu indeks LI dan CAPE menunjukkan jumlah Hits yang relatif lebih rendah, tetapi tetap menghasilkan false alarm yang tinggi, menandakan bahwa banyak kejadian TS yang terlewat (Misses) atau dengan kata lain stabilitas yang diprediksi tidak sesuai dengan kejadian sebenarnya.



Gambar 7. Peringkat Indeks Stabilitas Terbaik Berdasarkan Kontingensi CSI

Diagram ranking skor CSI menunjukkan bahwa Lifted Index (LI) memiliki performa terbaik sebagai prediktor kejadian TS selama satu tahun di Stasiun Meteorologi Kelas I Juanda, dengan nilai CSI tertinggi yaitu 0.136. Nilai ini diikuti secara berurutan oleh K-Index (KI) sebesar 0.134 dan Total Totals Index (TTI) sebesar 0.123, menandakan bahwa ketiga indeks ini relatif seimbang dalam mendeteksi TS sekaligus meminimalkan false alarm dibanding indeks lainnya. Sementara itu, indeks lainnya seperti Showalter Index (SI), CAPE, dan SWEAT memiliki nilai CSI yang lebih rendah (SI = 0.110, CAPE = 0.109, dan SWEAT = 0.098), menunjukkan bahwa meskipun indeks-indeks tersebut sensitif dalam menangkap kondisi stabilitas atmosfer, namun tingkat akurasinya secara keseluruhan lebih rendah karena tingginya false alarm dan misses yang terjadi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis performa indeks stabilitas termodinamik terhadap kejadian *Thunderstorm* di Bandar Udara Juanda, disimpulkan bahwa kejadian badai guntur memiliki pola musiman yang kuat dengan intensitas tertinggi pada puncak musim hujan (Desember-Februari), di mana indeks stabilitas menunjukkan respons separasi nilai yang lebih jelas dibandingkan musim kemarau. Secara kuantitatif, parameter Lifted Index (LI) terbukti menjadi indikator paling andal untuk prediksi jangka pendek (6 jam) dengan skor *Critical Success Index* (CSI) tertinggi dibandingkan lima parameter lainnya, mengindikasikan bahwa selisih suhu parsel udara lebih sensitif menggambarkan kondisi atmosfer lokal daripada energi konvektif murni. Namun, rendahnya nilai akurasi secara umum (< 0.2) menunjukkan bahwa ambang batas standar internasional kurang efektif diterapkan secara langsung karena masih menghasilkan tingkat kesalahan prediksi yang cukup tinggi.

Bagi operasional meteorologi penerbangan, disarankan untuk memprioritaskan pemantauan Lifted Index (LI) sebagai acuan awal *nowcasting* di pagi hari yang dikombinasikan dengan data pengamatan lain seperti radar cuaca untuk hasil yang lebih presisi. Penelitian selanjutnya sangat direkomendasikan untuk menentukan nilai ambang batas (*threshold*) baru yang spesifik untuk wilayah Surabaya guna mengurangi tingkat *False Alarm*, serta mengembangkan studi dengan rentang waktu data yang lebih lama (multi-tahun) agar dapat menangkap variabilitas iklim global sehingga evaluasi performa indeks menjadi lebih komprehensif dan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Akhirta, N., Sujiono, E.H. and Palloan, P., 2023. Karakteristik Sistem Awan Konvektif Cumulonimbus Berbasis Radar Cuaca C-Band di Sekitar Bandar Udara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar. *Jurnal Fisika Unand*, 12(4), pp.568–576. https://doi.org/10.25077/jfu.12.4.568-576.2023

Anggoro, M.D. and Ananti, A.B., 2023. Kajian Intensitas Hujan Tahun 2002–2022 di Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 3(5), pp.38–45. https://www.balai2bmkg.id/index.php/buletin_mkg/article/view/70

Azizah, A.N., 2022. Analisis Pengaruh Fasilitas Pada Terminal 1 Terhadap Kepuasan Penumpang di Bandar Udara Juanda Surabaya. *Ground Handling Dirgantara*, 4(02), pp.289–295. https://doi.org/10.56521/jgh.v4i02.427

BMG, 2006. Peraturan Kepala Badan Meteorologi dan Geofisika (KBMG) Nomor SK.44/ME.104/KB/BMG tahun 2006 tentang Tata Cara Tetap Pelaksanaan, Pengamatan, Penyandian, dan Pelaporan Hasil Pengamatan Meteorologi Udara Atas. Jakarta: BMG.

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2015. Peraturan Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Nomor 13 Tahun 2015 tentang Tata Cara Tetap Pelaksanaan Pembuatan, Penyampaian, Penyebaran, Pembatalan dan Pengakhiran Wind Shear Warning dan Aerodrome Warning di Lingkungan BMKG.

Cau, P., Methven, J. and Hoskins, B., 2007. Origins of Dry Air in the Tropics and Subtropics. *Journal of Climate*, 20(12), pp.2745–2759. https://doi.org/10.1175/JCLI4176.1

Fibriantika, E. and Mayangwulan, D., 2020. Analisis Spasial Indeks Stabilitas Udara di Indonesia. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 21(1), pp.1–12. https://doi.org/10.29122/jstmc.v21i1.4005

Kolay, O., Efe, B., Özdemir, E. T. and Aslan, Z., 2025. A Multi-Year Investigation of Thunderstorm Activity at Istanbul International Airport Using Atmospheric Stability Indices. *Atmosphere*, 16(4), p.470. https://doi.org/10.3390/atmos16040470

Kurnia, U., Sugiyanto, D., & Tauladani, R., 2018. Analisis Potensi Terjadinya Thunderstorm Menggunakan Metode SWEAT di Stasiun Meteorologi Sultan Iskandar Muda Potential Analysis of Thunderstorm Occurrence Using SWEAT Method at Meteorology Station Sultan Iskandar Muda.

Kusumawardani, N. and Azani, A.A., 2022. Kajian Indeks Stabilitas Atmosfer terhadap Kejadian Hujan Lebat di Kota Bitung (Studi Kasus Tahun 2020–2021). *Jurnal Widya*

Climago, 4(1).

Lubis, N.A.Z., Hasibuan, A.A. and Siregar, D.C., 2020. Kajian Stabilitas Atmosfer di Bandar Udara Sultan Iskandar Muda (Studi Kasus Tanggal 15, 17, 20, 21, dan 22 Oktober 2019). *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 10(01), pp.01–09. https://doi.org/10.24198/jmei.v10i01.29011

NWS, 2022. National Weather Service: Definition of atmospheric variables, atmospheric stability indices. Available at: https://www.weather.gov/ffc/gloss2 [Accessed 19 November 2025].

Rizki, Y.S., 2012. Pelayanan Informasi Meteorologi Penerbangan di Bandar Udara Fatmawati Bengkulu. *Warta Ardhia*, 38(4), pp.396–408. https://doi.org/10.25104/wa.v38i4.206.396-408

Stipanuk, G.S., 1973. Algorithms for generating a SKEW-T, log p diagram and computing selected meteorological quantities. National Technical Information Service. https://badpets.net/Documents/Atmos_Thermodynamics.pdf

Wirjohamidjojo, S. and Swarinoto, Y.S., 2014. Indeks dan Peredaran Atmosfer Tropik. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

Winaya, I.B.G. and Alw, L.T., 2016. Pengaturan Kawasan Keselamatan Operasi Penerbangan: Studi tentang Pelaksanaan Kewenangan Pemerintah Daerah dalam Mengendalikan Pembangunan dan Benda Tumbuh di Kawasan Keselamatan Operasi Penerbangan Bandar Udara Ahmad Yani Semarang. *Law Reform*, 12(1), pp.17–46. https://doi.org/10.14710/lr.v12i1.15839

Yavuz, V., 2024. Performance analyses of thermodynamic indices and atmospheric parameters in thunderstorm and non-thunderstorm days in Istanbul, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 181(7), pp.2297–2316. https://doi.org/10.1007/s00024-024-03521-0

Zahroh, N.F., Dewi, N.W.S.P. and Harsanti, D., 2017. Indeks Stabilitas Udara untuk Memprediksi Kejadian Badai Guntur pada Puncak Musim Hujan Tahun 2016. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 18(1), pp.9–15.