**BAB I**

**PENDAHULUAN**

**1. Latar Belakang**

Indonesia yang terletak di wilayah tropis menjadikan wilayah ini menerima paparan energi panas yang tinggi sepanjang tahun. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan yang sangat kondusif bagi pembentukan awan konvektif, khususnya awan *Cumulus* dan *Cumulonimbus*, yang kehadirannya sangat dipengaruhi oleh faktor musiman maupun non-musiman (Tjasyono, 2006). Awan-awan konvektif seperti *Cumulus* (Cu) dan terutama *Cumulonimbus* (Cb) menjadi perhatian penting karena berpotensi besar memicu kejadian cuaca ekstrem seperti hujan deras, angin kencang, hujan es, puting beliung, dan badai petir (*Thunderstorm*). Indonesia bahkan mengalami sambaran petir sekitar 100 kali per hari dalam satu tahun, jauh lebih sering dibandingkan dengan wilayah subtropis yang hanya mencatat sekitar 50 kali dalam periode yang sama (Tjasyono, 2006). Badai petir sendiri merupakan hasil dari pertumbuhan awan *Cumulonimbus* tunggal maupun dalam gugusan. Fenomena ini dapat membawa dampak signifikan berupa angin permukaan yang kuat, curah hujan tinggi, serta hujan es (*hail*). Umumnya, badai petir terjadi ketika massa udara hangat bergerak naik dalam atmosfer yang tidak stabil. Semakin besar selisih suhu antara massa udara tersebut dengan lingkungan sekitarnya, maka semakin besar daya apungnya, sehingga konveksi pun menjadi lebih intens (Ahrens, 2012). Pertumbuhan awan konvektif secara langsung berhubungan dengan tingkat stabilitas atmosfer. Ketika atmosfer berada dalam kondisi tidak stabil, potensi pertumbuhan awan konvektif akan semakin tinggi. Untuk mengetahui sejauh mana atmosfer bersifat stabil atau tidak, maka diperlukan pengamatan udara atas, salah satunya menggunakan instrumen radiosonde (Isnoor, 2017).

Mampu memprediksi kemungkinan terjadinya badai petir adalah langkah penting dalam upaya mitigasi bencana, mengingat dampak buruk yang dapat ditimbulkannya (Mayangwulan, 2011). Dari pengamatan radiosonde inilah kemudian dikembangkan indeks stabilitas atmosfer, yang tidak hanya digunakan untuk prediksi cuaca ekstrem, tetapi juga sangat penting dalam operasional penerbangan, khususnya dalam mendeteksi kemungkinan hujan lebat akibat badai petir (Zahroh, 2017). Beragam indeks stabilitas atmosfer yang kini digunakan secara luas oleh para peneliti dan prakirawan cuaca, sejatinya berawal dari kajian intensif yang dilakukan oleh Angkatan Udara Amerika Serikat (*US Air Force*) di tahun 1990. Kajian tersebut menekankan pentingnya indeks stabilitas dalam mendukung keberhasilan misi operasi militer mereka di lintang tengah dan tinggi, khususnya untuk memahami kondisi cuaca ekstrem yang mungkin terjadi. Dari kajian ini lahirlah sejumlah indeks yang kemudian menjadi referensi utama dalam meteorologi global (Force, 1990). Meski begitu, ambang batas indeks stabilitas yang dikembangkan di wilayah Amerika belum tentu sepenuhnya merepresentasikan kompleksitas atmosfer tropis seperti di Indonesia (Widodo, 2018). Oleh karena itu, pendekatan lokal menjadi sangat penting agar dapat diperoleh nilai ambang batas yang benar-benar sesuai dengan kondisi atmosfer di wilayah tropis (Permatasari, 2019). Sejumlah penelitian sebelumnya telah mencoba menetapkan ambang batas ini di berbagai wilayah Indonesia. Budiarti (2012) mengkajinya di kawasan Cengkareng–Banten, Widodo (2018) di wilayah Sorong, dan Wardana (2018) di Ranai–Kepulauan Riau. Dalam penelitian-penelitian tersebut digunakan berbagai jenis indeks stabilitas seperti Lifted Index (LI), K-Index (KI), Total Totals Index (TT), Severe Weather Threat Index (SWEAT), Convective Available Potential Energy (CAPE), dan Showalter Index (SI). Seluruh indeks diperoleh dari data radiosonde yang diolah melalui aplikasi RAOB.

Stasiun Meteorologi Klas I Juanda yang terletak di Surabaya merupakan salah satu unit pelaksana teknis Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) yang memiliki tugas utama dalam pelayanan informasi cuaca secara umum maupun khusus untuk penerbangan. Salah satu bentuk layanan tersebut adalah penyediaan prakiraan kondisi atmosfer, termasuk mendeteksi potensi pertumbuhan awan *Cumulonimbus*. Hingga saat ini, belum terdapat kajian indeks stabilitas atmosfer yang secara khusus dilakukan di Stasiun Meteorologi Juanda. Mengingat pentingnya nilai indeks ini dalam operasional teknis prakiraan cuaca, maka penelitian ini difokuskan di wilayah kerja Stasiun Meteorologi Juanda. Kondisi stabilitas atmosfer di wilayah Surabaya dan sekitarnya dianalisis menggunakan data radiosonde dari Stasiun Meteorologi Juanda untuk menghitung nilai indeks seperti *Lifted Index* (LI), *K Index* (KI), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), *Total Totals Index* (TT), dan *Showalter Index* (SI). Seluruh indeks ini kemudian diverifikasi dengan data permukaan dari laporan *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) yang menunjukkan kehadiran awan *Cumulonimbus*. Dalam menentukan ambang batas indeks yang baru dan lebih spesifik untuk wilayah ini, digunakan pendekatan statistik metode Sturges (1926) serta metode dikotomi. Diharapkan hasil kajian ini mampu memberikan informasi yang lebih representatif mengenai nilai indeks stabilitas atmosfer yang berkaitan langsung dengan pertumbuhan awan Cumulonimbus dan kejadian badai petir (thunderstorm) di wilayah Surabaya dan sekitarnya.

**2. Rumusan Masalah**

a. Berapa nilai ambang batas indeks stabilitas atmosfer di Stasiun Meteorologi Juanda yang berkorelasi dengan pembentukan awan *Cumulonimbus*?

b. Seberapa akurat nilai ambang batas tersebut dalam menggambarkan potensi pertumbuhan awan *Cumulonimbus* di wilayah pengamatan?

**3. Batasan Masalah**

a. Penelitian ini difokuskan di wilayah kerja Stasiun Meteorologi Klas I Juanda, Surabaya, Provinsi Jawa Timur.

b. Data yang digunakan mencakup data udara atas (radiosonde/sandi TEMP) dan data permukaan dari laporan cuaca METAR.

c. Data METAR yang digunakan hanya yang mencantumkan keberadaan awan *Cumulonimbus*.

d. Rentang data yang digunakan adalah 5 tahun yaitu tahun 2018-2022.

e. Data yang digunakan adalah data bulan Desember, Januari, Pebruari (DJF) dan Maret, April, Mei (MAM) selama 5 tahun.

f. Penelitian ini menggunakan indeks stabilitas udara berupa *Lifted Index* (LI), *K-Index* (KI), *Total-Totals Index* (TT), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), dan *Showalter Index* (SI) pada saat terdapat awan *Cumulunimbus*.

g. Penentuan nilai ambang batas baru di wilayah Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya menggunakan metode Sturges.

**4. Tujuan Penelitian**

1. Menentukan nilai ambang batas baru dengan menggunakan metode Sturges.
2. Verifikasi akurasi nilai ambang batas baru pada saat terdapat awan *Cumulonimbus*.

**5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan akurasi prakiraan cuaca ekstrem di Indonesia, khususnya melalui pendekatan berbasis data radiosonde. Nilai ambang batas indeks stabilitas atmosfer yang diperoleh dapat menjadi acuan baru dalam menyusun prakiraan badai petir secara lebih tepat sasaran, serta memperkuat peran ilmiah dan teknis prakirawan cuaca dalam mendeteksi potensi cuaca ekstrem di wilayah tropis.

**6. Sistematika Penulisan**

Sistematika yang digunakan dalam penulisan ini adalah sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN, menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

2. BAB II DASAR TEORI, berisi tinjauan pustaka dan landasan teori yang digunakan pada penelitian kali ini.

3. BAB III DATA DAN METODE, berisi jenis penelitian, prosedur penelitian, dan diagram alir penelitian.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, memaparkan secara rinci hasil dari pengolahan data, analisis, dan pembahasan penelitian.

5. BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis penelitian.

6. DAFTAR PUSTAKA, berisi sumber yang menjadi acuan dan pendukung dalam penelitian ini.

**BAB II**

**DASAR TEORI**

**1. Tinjauan Pustaka**

Awan konvektif, khususnya jenis *Cumulonimbus*, merupakan objek penting dalam kajian meteorologi karena kaitannya yang erat dengan fenomena cuaca ekstrem. Awan ini umumnya tumbuh dalam kondisi atmosfer yang tidak stabil, sehingga tingkat ketidakstabilan atmosfer menjadi indikator utama dalam memahami potensi pembentukan awan-awan konvektif (Isnoor, 2017). Untuk mendukung pertumbuhan badai petir, setidaknya diperlukan empat komponen utama, yaitu kelembapan udara yang tinggi, ketidakstabilan atmosfer, adanya geseran angin (*wind shear*), serta faktor pemicu pengangkatan seperti topografi atau pertemuan massa udara. Dalam proses analisisnya, diagram termodinamika dan hodograf kerap digunakan untuk menilai ketersediaan kelembapan, kestabilan statis, dan keberadaan geseran angin (Stull, 2017).

Berbagai indeks stabilitas atmosfer telah dikembangkan guna membantu prakiraan badai petir secara lebih efisien dan objektif. Indeks-indeks ini umumnya dihitung berdasarkan hasil pengamatan udara atas menggunakan radiosonde, yang kemudian dianalisis melalui perangkat lunak seperti RAOB. Data hasil olahan ini menghasilkan angka-angka indeks yang dapat menggambarkan kondisi atmosfer saat itu. Namun, sebagian besar ambang batas dari indeks-indeks tersebut dikembangkan di wilayah lintang menengah dan tinggi, sehingga belum tentu sesuai dengan karakteristik atmosfer tropis seperti di Indonesia (Widodo, 2018). Penelitian serupa telah dilakukan di beberapa wilayah dengan pendekatan evaluasi indeks stabilitas yang disesuaikan secara lokal. Marinaki (2006) melakukan penelitian selama 23 tahun di 17 stasiun meteorologi di Yunani. Dalam penelitiannya, ia mengevaluasi tujuh indeks stabilitas atmosfer, yaitu *Showalter Index, K-Index, Boyden Index, Jefferson Index, Total Totals Index, Humidity Index,* dan *Yometani Index*. Data diolah menggunakan metode tabel kontingensi statistik untuk menilai kinerja indeks dalam mendeteksi badai petir. Hasilnya menunjukkan bahwa *Jefferson Index* merupakan indeks yang paling akurat dalam memprediksi kejadian badai petir dibandingkan enam indeks lainnya. Di Indonesia, Budiarti dkk. (2012) mengkaji indeks stabilitas atmosfer untuk prakiraan badai petir di wilayah Stasiun Meteorologi Cengkareng–Banten. Penelitian menggunakan data observasi Rawinsonde selama 11 tahun (2000–2010), dengan waktu pengamatan pukul 00.00 UTC. Tiga indeks utama yang dianalisis adalah *Total Totals Index* (TT), *K-Index* (KI), dan *Severe Weather Threat Index* (SWEAT). Pengolahan data dilakukan menggunakan metode Sturges, dan hasilnya menunjukkan bahwa badai petir paling sering terjadi pada rentang TT antara 42–46 (70,95%), KI antara 29–37 (74,72%), dan SWEAT antara 135–239 (91% dan 86%). Penelitian oleh Nurrohman dan Tjasyono (2016) dilakukan di wilayah Makassar, dengan fokus pada hubungan antara nilai indeks stabilitas atmosfer dan kejadian hujan lebat. Data yang digunakan berasal dari observasi radiosonde di Stasiun Meteorologi Hasanuddin pada periode Desember 2013 hingga Desember 2015, antara pukul 00.00 UTC hingga 12.00 UTC. Dalam kajiannya, nilai *Showalter Index* (SI) menunjukkan atmosfer stabil saat hujan lebat, sementara nilai *Lifted Index* (LI) negatif, mengindikasikan atmosfer yang tidak stabil. Nilai SWEAT berada pada kisaran 200-an, yang mencerminkan potensi cuaca buruk. Sementara itu, nilai CAPE menunjukkan konveksi sedang di pagi hari dan melemah menjelang siang.

Widodo (2018) meneliti ambang batas indeks stabilitas atmosfer pada saat terjadi badai petir di wilayah Sorong, dengan data dari bulan Januari 2015 hingga Agustus 2017. Pengamatan menggunakan sandi TEMP (TTAA) dianalisis untuk menghasilkan indeks SI, LI, KI, TT, dan SWEAT. Indeks-indeks tersebut kemudian diolah menggunakan metode Sturges. Penelitian ini menghasilkan ambang batas baru berdasarkan musim, misalnya pada periode Desember–Februari (DJF): SI ≥ 0, LI ≤ -4, SWEAT ≥ 210, KI ≥ 35, dan TT ≥ 42. Sedangkan pada musim Maret–Mei (MAM): SI ≥ -1, LI ≤ -5, SWEAT ≥ 200, KI ≥ 33, dan TT ≥ 42. Variasi ambang batas ini menunjukkan bahwa potensi badai petir sangat dipengaruhi oleh dinamika atmosfer musiman. Wardana (2018) juga mengkaji penentuan ambang batas indeks stabilitas atmosfer di Stasiun Meteorologi Ranai, Kepulauan Riau. Data yang digunakan berasal dari observasi Rawinsonde periode 2013–2017 dalam bentuk sandi TEMP. Indeks yang dihitung meliputi LI, KI, TT, CAPE, dan SWEAT, dan diproses dengan metode Sturges. Hasilnya menunjukkan bahwa ambang batas yang sesuai untuk kejadian awan Cumulonimbus di wilayah ini adalah LI < -1, KI > 34, TT > 42. Untuk indeks SWEAT, terdapat perbedaan nilai ambang batas antara kejadian awan Cb yang disertai badai petir (SWEAT > 186) dan tanpa badai petir (SWEAT > 219), menandakan pentingnya penyesuaian nilai ambang batas terhadap jenis kejadian cuaca. Secara umum, berbagai penelitian di atas menegaskan pentingnya penyesuaian nilai ambang batas indeks stabilitas atmosfer berdasarkan karakteristik wilayah tropis Indonesia. Pemahaman ini menjadi dasar yang kuat untuk melakukan kajian lanjutan di wilayah lain, seperti yang akan dilakukan dalam penelitian ini di Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya.

**2. Landasan Teori**

Penelitian ini didasarkan pada beberapa konsep utama dalam ilmu meteorologi, khususnya terkait dengan pengamatan atmosfer atas dan indeks-indeks yang digunakan untuk menilai kestabilan udara. Beberapa teori penting yang menjadi fondasi penelitian ini mencakup: Stabilitas Atmosfer, Radiosonde, *Rawinsonde Observation* (RAOB), Indeks Stabilitas Atmosfer, serta Mikrofisika Awan Cumulonimbus.

*a. Stabilitas Atmosfer*

Stabilitas atmosfer menggambarkan kecenderungan suatu massa udara untuk mengalami pergerakan vertikal, baik naik maupun turun, sebagai respons terhadap lingkungan termal di sekitarnya. Stabilitas ini umumnya dievaluasi berdasarkan laju penurunan suhu vertikal (*lapse rate*) atau laju penurunan suhu potensial (𝜕∅⁄𝜕𝑧) (Wardana, 2018). Kondisi atmosfer yang tidak stabil akan memicu pertumbuhan awan konvektif secara cepat dan intens, sehingga penting untuk memahami profil suhu vertikal terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Profil ini memberikan gambaran pengaruh lapisan atmosfer bawah terhadap pembentukan maupun inversi awan (Lisnawati, 2018). Menurut Wirjohamidjojo (2013), laju penurunan suhu vertikal menunjukkan sejauh mana suhu menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian. Ketika massa udara naik secara adiabatik, ia akan mengalami pendinginan. Proses ini disebut laju susut suhu adiabatik, yang diklasifikasikan menjadi dua jenis (Wirjohamidjojo dan Swarinoto, 2013):

* + - 1. Laju Susut Suhu Adiabatik

Laju susut suhu adiabatik kering (*dry adiabatic temperature lapse rate*) terjadi ketika massa udara kering naik secara vertikal dan mengalami penurunan suhu secara adiabatik.

* 1. Laju susut suhu adiabatik jenuh (*saturated adiabatic temperature lapse rate*) terjadi ketika massa udara jenuh (mengandung uap air dalam jumlah maksimum) naik dan kehilangan suhu karena kondensasi, juga secara adiabatik.

Perbedaan antara kedua laju susut ini menjadi kunci penting dalam menentukan apakah atmosfer akan mendukung terbentuknya awan konvektif atau tidak.

*b. Radiosonde*

Radiosonde merupakan perangkat utama dalam pengamatan atmosfer atas yang memberikan data penting untuk keperluan analisis cuaca dan prakiraan meteorologi (Yoneyama, 2002). Mengingat keterbatasan manusia dalam melakukan observasi langsung di lapisan atas atmosfer, radiosonde hadir sebagai solusi efisien dan relatif aman untuk mengukur berbagai parameter atmosfer vertikal. Gambar 2.1 merupakan contoh transmitter yang dipakai untuk pengamatan radiosonde.



**Gambar 2.1** *Transmitter Radiosonde* (Sumber: Stasiun Meteorologi Juanda)

. Menurut Ahrens et al. (2012), radiosonde adalah perangkat kecil dan ringan yang dilengkapi dengan sensor cuaca elektronik, baterai, sistem GPS, serta pemancar radio seperti terlihat pada Gambar 2.1. Perangkat ini diikatkan pada balon helium dan dilepaskan ke atmosfer. Selama naik hingga ketinggian 33 km, radiosonde mengukur parameter seperti suhu, tekanan, kelembapan, dan kecepatan angin. Posisi radiosonde dilacak menggunakan sinyal GPS, sehingga pergerakan vertikal angin juga dapat ditentukan secara akurat (Handayani, 2016). Observasi radiosonde umumnya dilakukan dua kali sehari, yaitu pada pukul 00:00 UTC dan 12:00 UTC. Karena biaya yang tinggi dan sifatnya yang sekali pakai, tidak semua stasiun meteorologi dapat melaksanakan pengamatan ini secara rutin. Perlu dicatat bahwa balon radiosonde tidak bergerak secara vertikal lurus. Menurut Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2013), posisi balon akan cenderung menyimpang seiring kenaikan ketinggian, sehingga area cakupan radiosonde membentuk kerucut terbalik dengan pusat di titik peluncuran. Meski demikian, data dari lapisan hingga 100 mb dan radius pengamatan tidak lebih dari 250 km tetap dianggap representatif.

*c. Indeks Stabilitas*

Indeks stabilitas atmosfer merupakan hasil olahan dari data udara atas yang diperoleh menggunakan radiosonde. Indeks-indeks ini memberikan gambaran kuantitatif tentang kecenderungan atmosfer untuk mengalami konveksi dan berperan penting dalam prediksi pembentukan awan konvektif (Fibriantika dan Mayangwiulan, 2020). Dalam penelitian ini, pengolahan data dilakukan menggunakan aplikasi RAOB, yang menghasilkan berbagai nilai indeks berdasarkan profil suhu dan kelembapan vertikal.

Beberapa indeks yang umum digunakan dalam berbagai studi meteorologi adalah: *Lifted Index* (LI), *K Index* (KI), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), *Total Totals Index* (TT), dan *Showalter Index* (SI). Indeks-indeks tersebut awalnya dikembangkan berdasarkan karakteristik atmosfer lintang menengah dan tinggi, khususnya oleh institusi militer seperti *US Air Force*. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan agar nilai-nilai indeks tersebut dapat disesuaikan dengan kondisi tropis seperti di Indonesia (Budiarti, 2012). Dalam konteks lokal, penting untuk menyesuaikan ambang batas indeks tersebut, karena faktor seperti letak geografis, musim, dan kondisi sinoptik turut memengaruhi efektivitas masing-masing indeks (Marinaki, 2006).

1. *Lifted Index (LI)*

*Lifted Index* (LI) merupakan salah satu indeks stabilitas atmosfer yang paling sering digunakan untuk menilai potensi terjadinya badai guntur atau cuaca konvektif. Indeks ini diperoleh dari selisih antara suhu lingkungan pada lapisan 500 mb dengan suhu sebuah parsel udara yang diangkat secara adiabatik dari permukaan hingga mencapai lapisan yang sama (Force, 1990). Konsep dasar dari LI adalah membandingkan apakah udara yang naik (parsel) lebih hangat atau lebih dingin dibandingkan udara di sekitarnya. Jika suhu parsel lebih hangat daripada lingkungan, maka parsel cenderung akan terus naik karena memiliki daya apung, menandakan kondisi atmosfer yang tidak stabil. Sebaliknya, jika suhu parsel lebih dingin, maka parsel akan cenderung tenggelam kembali, menunjukkan kondisi atmosfer stabil. Oleh karena itu, nilai LI yang positif mengindikasikan atmosfer stabil, sedangkan nilai negatif menunjukkan ketidakstabilan atmosfer yang dapat memicu pembentukan awan konvektif dan hujan deras. Semakin negatif nilai LI, maka semakin besar potensi atmosfer untuk mendukung proses konveksi kuat. Menurut Kim dan Lee (2005), nilai LI yang mencapai -6 atau lebih rendah menunjukkan kondisi yang sangat tidak stabil dan berpotensi besar menimbulkan hujan dengan intensitas sangat lebat. *Lifted Index* dihitung menggunakan persamaan 2.1 sehingga Force (1990) menghasilkan klasifikasi indeks pada Tabel 2.1.

LI = T500 – TP500 (2.1)

Keterangan :

T500 : suhu udara lingkungan yang diukur Radiosonde pada lapisan 500 mb.

TP500 : suhu parsel udara pada lapisan 500 mb yang dinaikan secara adiabatik kering dari lapisan permukaan sampai paras kondensasi dan secara adiabatik jenuh sampai lapisan 500 mb.

**Tabel 2.1 Nilai Lifted Index (LI) dan klasifikasinya** (*Sumber: Force, 1990*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai LI** | **Indikasi Badai Guntur** |
| 0 sampai -2 | Badai mungkin terjadi, dibutuhkan mekanisme pendukung yang kuat |
| -3 sampai -5 | Tidak stabil, badai mungkin terjadi |
| Kurang dari -5 | Sangat tidak stabil, berpotensi badai guntur kuat |

1. *K-Index* (KI)

Indeks penting selanjutnya untuk memprediksi potensi badai guntur adalah *K-Index* (KI). KI merupakan ukuran potensi badai akibat gerak konvektif, berdasarkan selang suhu vertikal, dan kelembaban atmosfer (Force,1990). Indeks ini penting untuk memprediksi curah hujan dengan intensitas sangat lebat. *K-Index*(KI) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2 sehingga didapatkan klasifikasi seperti pada Tabel 2.2.

KI=(T850 – T500) + Td850 – (T700 – Td700) (2.2)

Keterangan:

T850 : suhu udara pada ketinggian 850 mb dalam oC.

T500 : suhu udara pada ketinggian 500 mb dalam oC.

Td850 : suhu titik embun pada ketinggian 850 mb dalam oC.

T700 : suhu udara pada ketinggian 700 mb dalam oC.

Td700 : suhu titik embun pada ketinggian 700 mb dalam oC.

**Tabel 2.2 Nilai K- Index (KI) dan klasifikasinya** (*Sumber: Force, 1990*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai KI** | **Kemungkinan Badai Guntur Dalam Persen (%)** |
| <15 | 0 |
| 15-20 | 20 |
| 21-25 | 20-40 |
| 26-30 | 40-60 |
| 31-35 | 60-80 |
| 36-40 | 80-90 |
| >40 | hampir 100 |

1. *Severe Weather Threat Index* (SWEAT)

Index SWEAT digunakan untuk memperkirakan potensi cuaca buruk, tetapi tetap memperhitungkan adanya mekanisme pemicu lain yang dapat mempengaruhi terjadinya cuaca buruk. Jika terdapat nilai indeks SWEAT yang tinggi pada pagi hari, kemungkinan adanya nilai indeks SWEAT yang tinggi pada sore atau malam hari sebelumnya. Nilai indeks SWEAT yang rendah menandakan tidak adanya cuaca yang buruk tetapi nilai indeks ini dapat meningkat secara drastis selama periode 12 jam (Force, 1990). Adapun persamaan 2.3 adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai SWEAT dan menghasilkan klasifikasi pada Tabel 2.3.

SWEAT=12Td850 + 20(TT-49) + 2fVV850 + VV500 + 125(s+0,2) (2.3)

Syarat perhitungan SWEAT :

i. Tidak ada nilai negatif.

ii. Td850 = 0 jika nilainya negatif.

iii. 20(TT-490) = 0 jika TT kurang dari 49.

iv. s = sin(dd500–dd850) = 0 jika memenuhi salah satu syarat berikut:

(i) dd500 antara 130⁰ sampai 250⁰

(ii) dd500 antara 210⁰ sampai 310⁰

(iii) dd500 ‒ dd850 > 0⁰

(iv) ff850 dan ff500 > 15 knots

Keterangan: :

Td850 : Suhu titik embun 850 mb dalam ºC

TT : Nilai Total Totals Index dalam ºC

VV850 : Kecepatan angin 850 mb dalam knots

VV500 : Kecepatan angin 500 mb dalam knots

dd850 : Arah angin 850 mb dalam derajat

dd500 : Arah angin 500 mb dalam derajat

**Tabel 2.3 Nilai SWEAT dan klasifikasinya** (*Sumber: Zakir, 2010*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai Indeks SWEAT** | **Potensi** |
| ≥ 250 | Indikasi ada konvektif |
| < 250 | Tidak ada konvektif |

1. *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE)

CAPE merupakan jumlah energi yang dimiliki oleh sebuah parsel udara jika diangkat secara vertikal pada jarak tertentu di atmosfer. Peningkatan nilai CAPE umumnya menyebabkan konveksi semakin kuat sehingga nilai ini dapat digunakan sebagai indeks stabilitas atmosfer. CAPE yang tinggi membutuhkan kelembapan dan suhu permukaan yang tinggi dan seringkali juga membutuhkan lapse rate yang kurang untuk menjaga ketidakstabilan terhadap ketinggian (DeRubertis, 2006). CAPE (*Convective Available Potential Energy*) memiliki kelebihan yaitu tidak terbatas hanya pada satu lapisan tertentu (Vujović dkk., 2015). CAPE (*Convective Available Potential Energy*) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 dan menghasilkan klasifikasi seperti pada Tabel 2.4.

(2.4)

Keterangan :

g: gravitasi bumi.

Tvp : suhu vertical parsel.

Tve : suhu virtual lingkungan.

zEL : ketinggian dari EL (*Equilibrium Level*)

zLFC : ketinggian dari LFC (*Lifting Condensation Level*)

**Tabel 2.4 Nilai CAPE dan klasifikasinya** (*Sumber: DeRubertis, 2006*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai Indeks CAPE** | **Kondisi Atmosfer** |
| CAPE < 1000 J/Kg | Stabil |
| CAPE 1000-2500 J/Kg | Cukup tidak stabil |
| CAPE >2500 J/Kg | Sangat tidak stabil, konveksi kuat kemungkinan besar |
|  |  |

1. *Total-Totals Index* (TT)

Indeks Total Total sebenarnya merupakan jumlah dari *Vertical Totals* (VT) dan *Cross Totals* (CT). Hal ini digunakan untuk mengukur potensi pengembangan badai dan tingkat kehebatan badai. *Vertical Totals* (VT) merupakan kondisi lapse rate diantara dua tekanan yang konstan yaitu lapisan 850 mb dan 500 mb, yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5. *Cross Totals* (CT) adalah pengurangan titik embun lapisan 850 mb dengan suhu lapisan 500 mb, yang dapat dihitung dengan persamaan 2.6. Pertama kali diperkenalkan oleh Miller (1972), dan dengan menggunakan persamaan 2.7 Force (1990) mengidentifikasi potensi badai guntur. Klasifikasi *Total-Totals Index* ditunjukkan pada Tabel 2.5.

VT = T850 – T500 (2.5)

CT = Td850 – T500 (2.6)

TT = (T850 – T500) + (Td850 – T500)(2.7)

Keterangan :

T850 : Suhu udara pada ketinggian 850 mb dalam ºC

T500 : Suhu udara pada ketinggian 500 mb dalam ºC

Td850 : Suhu titik embun pada ketinggian 850 mb dalam ºC

**Tabel 2.5 Nilai Total-Totals Index (TT) dan klasifikasinya** (*Sumber: Force, 1990*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai TT** | **Potensi** |
| Kurang dari 45 | Kelabilan lemah |
| 45 sampai 55 | Kelabilan sedang |
| Lebih dari 55 | Kelabilan kuat |

1. *Showalter Index* (SI)

*Showalter Index* (SI) adalah indeks yang digunakan untuk mengukur kestabilan atmosfer dan potensi konveksi, yang berkaitan dengan terbentuknya badai petir atau cuaca ekstrem. SI membandingkan kelembaban lapisan permukaan dan suhu lapisan level atas. SI di gunakan untuk menentukan potensi untuk pengembangan TS. Nilai-nilai tertentu telah ditemukan untuk mengidentifikasi kemungkinan dan intensitas badai. *Showalter Index* (SI) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 dan diklasifikasikan oleh Force (1990) seperti pada Tabel 2.6.

SI=Te500 – Tp500 (2.8)

Keterangan:

Te500 : Suhu udara pada ketinggian 500 mb

Tp500 :  Suhu parsel di lapisan 500 mb.

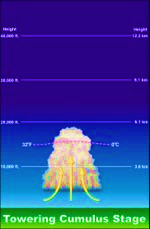
**Tabel 2.6 Nilai SI dan klasifikasinya** (*Sumber: Force, 1990*)

|  |  |
| --- | --- |
| **Nilai SI** | **Kondisi** |
| 1 s/d 3 | Hujan mungkin terjadi, badai petir mungkin terjadi |
| 0 s/d -3 | Badai petir mungkin terjadi |
| -4 s/d -6 | Badai petir besar mungkin terjadi |
| < -6 | Sangat tidak stabil, badai petir besar mungkin terjadi, tornado mungkin terjadi. |

*d. Mikrofisis Awan Cumulonimbus*

Awan merupakan hasil dari proses kondensasi uap air di atmosfer, yang terbentuk dari kumpulan tetesan air, kristal es, dan partikel udara kering pada ketinggian tertentu di atas permukaan bumi (Sosaidi, 2013). Di antara berbagai jenis awan, awan *Cumulonimbus* (Cb) memiliki karakteristik paling kompleks dan signifikan dalam dinamika cuaca ekstrem. Awan ini dikenal sebagai awan konvektif yang tumbuh secara vertikal sangat tinggi dan sering disertai fenomena cuaca buruk seperti hujan lebat, badai petir, angin kencang, bahkan hujan es (Ahrens, 2012). *Volume* awan Cb sangat besar dan dapat menjulang hingga mencapai *Tropopause*. Bagian atas awan Cb menyebar membentuk struktur seperti landasan atau *anvil*, yang merupakan tanda bahwa pertumbuhan vertikal telah mencapai lapisan atmosfer yang stabil. Karena potensi bahayanya, awan Cb menjadi perhatian utama dalam kegiatan penerbangan. Menurut Ahrens et al. (2012), pertumbuhan awan *Cumulonimbus* dapat dibagi ke dalam tiga fase utama, yaitu:

1. Fase Pertumbuhan (*Cumulus Stage*)

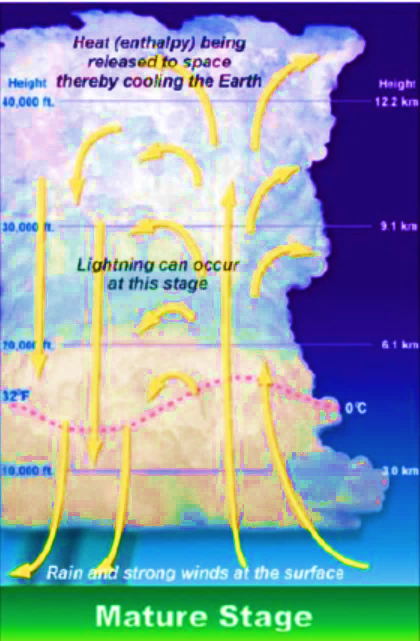


**Gambar 2.2** Fase pertumbuhan awan *Cumulonimbus* (*sumber: Researchgate.net*)

Fase ini ditandai dengan naiknya massa udara hangat dan lembap dari permukaan bumi seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2. Ketika udara naik secara adiabatik, ia mendingin hingga mencapai titik kondensasi dan membentuk awan Cumulus. Awan ini tumbuh ke atas secara cepat karena udara yang terkondensasi melepaskan panas laten yang memperkuat arus naik. Ketika kondensasi terjadi secara terus-menerus, awan akan tumbuh secara vertikal ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Pada saat ini, proses entrainment (pencampuran udara kering di sekitar awan) mulai terjadi dan dapat menyebabkan pendinginan melalui penguapan sebagian tetesan awan. Dalam tahap ini, belum terjadi hujan maupun petir, namun awan telah berkembang cukup tinggi sehingga siap memasuki tahap berikutnya.

ii. Fase Matang *(Mature Stage)*

Gambaran tentang fase matang awan Cumulonimbus dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini:

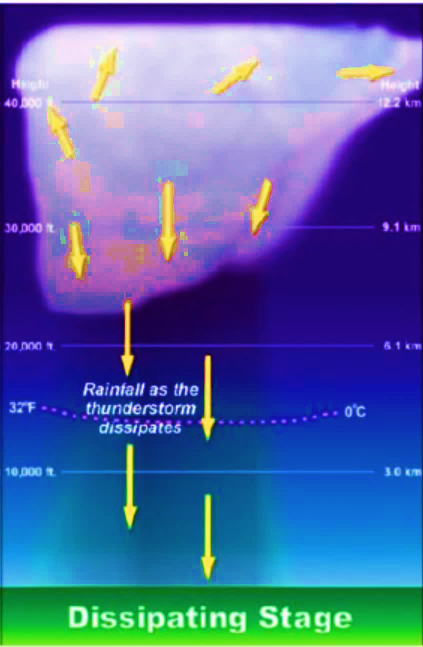


**Gambar 2.3** Fase matang awan *Cumulonimbus* (*sumber: Researchgate.net*)

Fase matang dimulai ketika tetesan air atau kristal es dalam awan telah cukup berat untuk jatuh sebagai presipitasi. Jatuhnya presipitasi menghasilkan *downdraft* (arus udara turun) yang menyertai arus naik yang masih aktif. Kombinasi *updraft* dan *downdraft* membentuk sel konvektif, dan pada fase inilah badai petir mencapai intensitas maksimumnya. Pada tahap ini pula terjadi turbulensi hebat di dalam awan, yang sering kali menimbulkan hujan lebat, kilat, guntur, dan bahkan hujan es. Angin kencang di permukaan disebabkan oleh udara dingin dari *downdraft* yang menyebar secara horizontal ketika mencapai permukaan, membentuk *gust* *front* (front hembusan angin). Udara hangat dan lembap di sekitarnya didorong masuk kembali ke dalam sistem badai, memperkuat siklus konvektif.

iii. Fase Peluruhan (*Dissipating Stage*)

Fase peluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.4, dimana fase peluruhan terjadi ketika arus naik melemah dan pada akhirnya berhenti.



**Gambar 2.4** Fase peluruhan awan *Cumulonimbus* (*sumber: Researchgate.net*)

Dominasi arus turun memutus suplai udara hangat dan lembap yang dibutuhkan untuk mempertahankan pertumbuhan awan. Akibatnya, awan mulai menguap dan menghilang secara bertahap. Presipitasi yang tersisa biasanya ringan, dan bagian bawah awan sering kali menyisakan kristal es atau tetesan air yang perlahan menguap. Sisa awan cirrus di bagian atas merupakan jejak terakhir dari awan Cb sebelum akhirnya seluruh struktur awan menghilang.

*e. Badai Guntur*

Pada awan Cb (awan kumulonimbus), terjadi gesekan dan timbul muatan listrik yang dapat menimbulkan badai petir . Badai biasanya dimulai ketika udara hangat dan lembab naik dalam kondisi atmosfer yang tidak stabil. Semakin hangat udara di dalam paket , semakin besar pula gaya apung yang dihasilkannya. Angin divergen di ketinggian, angin konvergen di permukaan, dan peningkatan massa udara semakin mendorong terbentuknya badai petir. Pengangkatan berbagai massa udara, angin di atas kepala yang berbeda, konvergensi angin permukaan, ketidakstabilan atmosfer, dan pergeseran angin menyebabkan terjadinya badai petir yang parah (Ahrens, 2012). Badai Petir (badai petir) merupakan salah satu fenomena meteorologi yang berdampak besar terhadap kehidupan manusia. Bahkan tidak jarang fenomena ini menyebabkan kematian dan kerusakan harta benda yang signifikan (Budiarti, 2012). Prediksi dini penting untuk mencegah kerusakan akibat badai petir, karena mempunyai dampak sosial dan ekonomi (Tyagi, 2011).

**BAB III**

**METODE PENELITIAN**

**1. Jenis Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang dipadukan dengan metode deskriptif. Pendekatan kuantitatif dipilih karena mampu mengolah dan menganalisis data numerik dengan alat bantu statistik, terutama dalam mengevaluasi hubungan antara nilai indeks stabilitas atmosfer dan kemunculan awan *Cumulonimbus* (Cb). Metode kuantitatif dalam penelitian ini digunakan untuk menganalisis data indeks stabilitas atmosfer hasil pengamatan udara atas yang kemudian dikaitkan dengan kejadian cuaca konvektif seperti hujan petir dan badai. Sementara itu, metode deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi stabilitas atmosfer pada saat terjadinya badai petir berdasarkan pengolahan data selama periode tertentu. Melalui kombinasi kedua pendekatan ini, penelitian tidak hanya menyajikan angka dan statistik, tetapi juga memberikan interpretasi visual dan naratif yang menggambarkan dinamika atmosfer di wilayah studi secara komprehensif.

**2. Prosedur Penelitian**

Sub bab ini menjelaskan tahapan-tahapan sistematis yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian, mulai dari lokasi, waktu, hingga teknik pengumpulan dan pengolahan data.

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Stasiun Meteorologi Klas I Juanda, yang terletak di Provinsi Jawa Timur, tepatnya di wilayah Surabaya seperti terlihat pada Gambar 3.1. Stasiun ini memiliki kode WMO 96935, dengan koordinat geografis 07°23'03.70" Lintang Selatan dan 112°47'02.68" Bujur Timur. Stasiun Juanda termasuk dalam kawasan beriklim tropis dengan pola hujan monsunal, yaitu karakteristik iklim yang menunjukkan perbedaan nyata antara musim hujan dan kemarau (Tukidi, 2010). Secara klimatologis, wilayah Juanda mengalami hujan hampir sepanjang tahun, namun intensitas tertinggi umumnya terjadi pada musim hujan, sementara curah hujan terendah terjadi pada bulan Agustus dan September berdasarkan data historis tahun 2005–2014. Untuk memastikan efektivitas perhitungan dan validitas hasil indeks stabilitas, maka penelitian difokuskan pada musim hujan, saat peluang terjadinya awan *Cumulonimbus* dan badai petir lebih besar. Waktu pengambilan data dilakukan pada periode Desember hingga Mei setiap tahunnya, yaitu selama musim hujan berlangsung dalam rentang waktu tahun 2018 hingga 2023.



**Gambar 3.1** Lokasi Penelitian

b. Data Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan data observasi meteorologi yang bersumber dari Stasiun Meteorologi Klas I Juanda Surabaya. Data yang digunakan terdiri dari data pengamatan udara atas (upper-air observation) serta data pengamatan cuaca permukaan, yang memiliki keterkaitan erat dalam identifikasi dan analisis kejadian konvektif seperti terbentuknya awan Cumulonimbus (Cb). Adapun jenis dan rincian data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data Radiosonde (Sandi TEMP)

Data ini diperoleh dari hasil pengamatan udara atas menggunakan alat radiosonde dalam bentuk sandi TEMP, yang merekam profil atmosfer secara vertikal pada dua waktu utama, yaitu pukul 00.00 UTC dan 12.00 UTC. Pengamatan dilakukan pada periode 1 Desember 2018 hingga 31 Mei 2023 di Stasiun Meteorologi Juanda.

1. Data METAR (*Meteorological Aerodrome Report*)

Data METAR merupakan laporan rutin cuaca permukaan yang diterbitkan setiap 30 menit. Dalam penelitian ini, data METAR digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan awan Cumulonimbus (Cb), yang dicatat secara eksplisit dalam laporan, serta sebagai dasar untuk verifikasi kejadian cuaca konvektif. Rentang waktu data METAR yang digunakan selaras dengan data sounding, yakni dari 1 Desember 2018 hingga 31 Mei 2023.

c. Alat Penelitian

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa perangkat lunak pendukung untuk mengelola, mengolah, dan menganalisis data yang berkaitan dengan kondisi atmosfer serta pengamatan awan Cumulonimbus (Cb). Adapun alat atau perangkat lunak yang digunakan meliputi:

1. *Microsoft Excel (Microsoft Office 2007)*

Digunakan sebagai perangkat lunak utama untuk pengelolaan data numerik, baik dari hasil observasi Metar maupun dari perhitungan indeks stabilitas atmosfer. Microsoft Excel digunakan untuk mengelompokkan data pelaporan Metar yang mengandung informasi keberadaan awan Cumulonimbus, serta mengorganisasi nilai-nilai indeks stabilitas atmosfer seperti *Lifted Index* (LI), *K-Index* (KI), *Total Total Index* (TT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), dan *Severe Weather Threat Index* (SWEAT). Excel juga digunakan untuk menyusun dan menghitung frekuensi kemunculan indeks sesuai dengan metode analisis (misalnya metode Sturges).

1. *Software* Notepad (Editor Teks Sederhana)

Notepad digunakan untuk memasukkan dan mengedit sandi pengamatan udara atas (sandi TEMP), yaitu TTAA, TTBB, TTCC, dan TTDD, yang merupakan hasil observasi radiosonde mentah. Data dalam format ini kemudian akan dimasukkan ke dalam perangkat lunak RAOB untuk diproses lebih lanjut.

1. Program RAOB *(Rawinsonde Observation Program)* versi 5.7

RAOB merupakan perangkat lunak khusus untuk analisis data sounding atau radiosonde, yang digunakan untuk menghitung berbagai indeks stabilitas atmosfer berdasarkan data vertikal suhu, kelembaban, dan tekanan. Dalam penelitian ini, RAOB digunakan untuk menghasilkan nilai dari indeks:

* *Lifted Index* (LI)
* *K Index* (KI)
* *Severe Weather Threat Index* (SWEAT)
* *Convective Available Potential Energy* (CAPE)
* *Total Totals Index* (TT)
* *Showalter Index* (SI)

Hasil perhitungan dari RAOB kemudian digunakan sebagai variabel utama dalam proses analisis dan verifikasi terhadap data Metar.

d. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data hasil pengamatan udara atas (sounding) yang diperoleh dari pengamatan Radiosonde dan juga menggunakan data pelaporan Metar. Data yang digunakan diuraikan dalam tabel, agar lebih mudah dalam mengolah seperti yang dilakukan oleh (Wardana, 2018), seperti terlihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Pengelompokan Data**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **No.** | **Jenis Data**  **Rincian Data** | **Data Sounding** | **Data Metar** |
| 1. | Jam | 00.00 dan 12.00 UTC | 00.00-11.00 UTC dan 12.00-23.00 UTC |
| 2. | Sumber Data | Stasiun Meteorologi Juanda | Stasiun Meteorologi Juanda |
| 3. | Kegunaan Data | Mencari indeks TT, LI, KI, CAPE, dan SWEAT. | Mencari data yang terdapat awan Cumulonimbus |
| 4. | Periode | 1 Desember 2017- 31 Maret 2023 | 1 Desember 2017 - 31 Mei 2023 |
| 5. | Format Data | Sandi Temp (TTAA, TTBB, TTCC, TTDD) | Sandi Metar |

e. Pengolahan Data

Pengolahan data penelitian menggunakan beberapa tahapan, diantaranya:

1. Pengolahan Data Metar (Data permukaan)

Data METAR yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu hasil pengamatan permukaan oleh petugas pengamat di Stasiun Meteorologi Klas I Juanda, serta dari aplikasi *Web-Aviation* BMKG. Seluruh hasil pengamatan yang dilakukan secara rutin oleh pengamat disusun dan disimpan dalam format tabulasi menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, sebagaimana ditampilkan pada Lampiran 1. Selain itu, data METAR juga diperoleh melalui proses pengunduhan dari situs resmi BMKG yang dikhususkan untuk layanan penerbangan, yaitu aviation.bmkg.go.id, sebagaimana tercantum dalam Lampiran 2. Secara umum, format laporan METAR disusun dalam bentuk sandi singkat yang mengikuti standar internasional ICAO (*International Civil Aviation Organization*). Sandi tersebut mengandung informasi penting seperti waktu pengamatan, arah dan kecepatan angin, visibilitas, kondisi awan, suhu dan tekanan udara, serta fenomena cuaca signifikan. Contoh laporan METAR yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

**METAR WARR 151200Z 26010KT 9999 FEW017CB SCT018 28/24 Q1011 NOSIG=**

***Interpretasi***:

METAR : Menyatakan bahwa ini adalah laporan meteorologi permukaan untuk wilayah aerodrome bandara,

WARR : *Call Sign* dari Juanda, Surabaya (kode dari *International Civil Aviation Organitation*/ICAO),

151200z : Tanggal 15, pukul 12:00 UTC (19.00 WIB),

26010KT : Angin dari barat (260°) dengan kecepatan 10 knot (18.5 km/jam),

9999 : *Visibility* (penglihatan mendatar) ≥10 km (jarak pandang baik),

FEW017CB : Awan Cumulonimbus dengan jumlah FEW = 1–2 oktas pada 1700 kaki (~518 m)

SCT018 : Awan tersebar (3–4 oktas) pada 1800 kaki (~549 m)

28/24 : Suhu udara 28°C, titik embun 24°C → kelembapan relatif tinggi

Q1011 : 1011 hPa (QNH, tekanan permukaan laut)

NOSIG : *No significant weather* — tidak ada perubahan cuaca signifikan

Dari data metar yang dibuat tiap 1/2 jam tersebut selanjutnya diseleksi dan dikelompokkan dalam *form* tabulasi di excel seperti pada Lampiran 3.

1. Pengolahan Data Udara Atas.

Data pengamatan udara atas yang kita peroleh berupa data teks (sandi) dalam aplikasi Notepad (Lampiran 4). Data tersebut selanjutnya disebut data sounding dan biasa disebut *Tango-Alpha* (TTAA)*, Tango-Bravo* (TTBB)*,, Tango-Charlie* (TTCC)*,, dan Tango-Delta* (TTDD)*,*, selain itu ada juga *Papa-Alpha* (PPAA)*, dan Papa-Bravo* (PPBB). Data sounding dalam format teks (sandi) selanjutnya diolah menggunakan aplikasi RAOB versi 5.7 (Lampiran 5) untuk menghasilkan data *Total Total Index* (TT), *Lifted Index* (LI), *K-Index* (KI), *Convective Available Potential Energy* (CAPE), *Showalter Index* (SI) dan *Severe Weather Threat Index*/SWEAT (Lampiran 6). Setelah diperoleh indeks stabilitas, kemudian data dikelompokkan berdasarkan waktu dalam hal ini bulan dan jam pengamatan (Lampiran 7). Setelah masing-masing indeks sudah diperoleh, maka Langkah selanjutnya adalah seleksi terhadap kemunculan awan CB. Setelah itu dikelompokkan untuk indeks stabilitas jam 00 UTC dengan data awan CB pukul 00-11 UTC sedangkan data indeks stabilitas jam 12 UTC dikelompokan dengan data awan CB pukul 12-23 UTC.

**3. Penentuan Nilai Ambang Baru**

Penentuan nilai ambang batas baru (*threshold*) indeks stabilitas untuk kejadian terbentuknya awan *Cumulunimbus* dan kejadian hujan disertai petir. Pembuatan nilai ambang batas baru terhadap indeks stabilitas *Lifted Index* (LI), *K-Index* (KI), *Total-Totals Index* (TT), *Convective Available Potential Energy* (CAPE), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) dan *Showalter Index* (SI) menggunakan metode Sturges yang dirumuskan sebagai berikut (Sturges, 1926):

Menentukan jumlah kelas (Sturges Rule), dengan persamaan 3.1.

k=1+3.322 log n (3.1)

Keterangan:

k : jumlah kelas

n : jumlah data

Menentukan luas interval (Range) pada tiap kelas dengan menggunakan menggunakan persamaan 3.2 (Nuryadi dkk., 2017) sebagai berikut:

R=Xn-X1 (3.2)

Keterangan:

R : range data observasi

Xn : nilai data tertinggi

X1 : nilai data terendah

Menentukan interval tiap kelas dengan menggunakan persamaan (Nuryadi dkk., 2017) dengan Persamaan 3.3 sebagai berikut:

Interval Kelas (Ci)= (3.3)

Keterangan:

Ci : interval kelas

R : selisih nilai data tertinggi dengan nilai data terendah (Range).

K: jumlah kelas

**4. Pengujian Data**

Melakukan pengujian data nilai ambang batas baru dari indeks stabilitas *Lifted Index* (LI), *K-Index* (KI), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy* (CAPE), *Total-Totals Index* (TT), dan *Showalter Index* (SI) yang telah didapatkan dengan data metar, diuji dengan cara sebagai berikut:

a. Menentukan jumlah frekuensi (Nuryadi dkk., 2017) Menghitung banyaknya data awan *Cumulonimbus* (Cb) dan dimasukan pada range kelas yang ada untuk tiap indeks.

b. Menentukan jumlah frekuensi persentase (Supranto, 2008). Jumlah frekuensi tiap kelas dihitung persentasenya terhadap frekuensi keseluruhan menggunakan persamaan berikut:

FR=() x 100 (3.4)

* + - * 1. Menentukan nilai yang banyak muncul atau *Modus* (Nuryadi dkk., 2017)
        2. Menentukan nilai yang sering muncul berdasarkan pada data yang telah dikelompokan.
        3. Modus mencerminkan hal yang paling tipikal atau kejadian yang sering terjadi.
        4. Menentukan nilai ambang dari interval indeks baru yang diperoleh (Supranto, 2008).
        5. Nilai ambang batas baru didasarkan pada nilai batas atas dan batas bawah pada nilai kelas yang sering muncul.
  1. **Verifikasi Data**

Verifikasi dilakukan dengan memakai data dari tahun 2023 menggunakan tehnik pengolahan data yang sama untuk melihat korelasi indeks baru dengan hasil data pengamatan permukaan berupa Metar. Setidaknya terdapat tiga alasan mengapa diperlukannya verifikasi terhadap suatu forecast yaitu untuk memantau (*monitor*), memperbaiki (*improve*), dan menghitung (*compute*). Nilai ambang batas baru yang telah didapatkan harus dilakukan verifikasi untuk mengetahui keakuratan dari nilai ambang batas baru yang telah didapatkan. Pengujian dilakukan terhadap data awan Cumulonimbus (Cb) yang muncul di wilayah Juanda pada periode 1 Januari 2023 hingga 31 Mei 2023. Verifikasi dilakukan dengan menggunakan metode dikotomi (ya atau tidak) yang menggunakan tabel kontingensi 2×2 (Tabel 3.2). Dari hasil tabel kontingensi maka akan dihitung nilai Akurasi, *Bias*, *False* *Alarm Ratio* (FAR), *Threat Score* (TSc), dan *Probability Detection* (POD).



Keterangan :

Hits : Prakiraan peristiwa akan terjadi, dan memang terjadi Misses

Misses : Prakiraan tidak akan terjadi, tetapi memang terjadi

False Alarms : Prakiraan peristiwa akan terjadi, tetapi tidak terjadi

Correct Negative : Prakiraan peristiwa tidak terjadi, dan tidak terjadi

Akurasi (*Accuracy*) mencerminkan korespondensi antara prakiraan dan peristiwa yang prakirakan. Dengan menggunakan akurasi kita dapat mengetahui secara keseluruhan berapa bagian dari prakiraan yang benar. Akurasi dirumuskan sebagai berikut(Wilks, 2019).

Akurasi= (3.5)

BIAS atau perbandingan perkiraan rata-rata dengan pengamatan rata-rata, biasanya direpresentasikan sebagai sebuah rasio untuk verifikasi tabel 28 kontingensi, biasnya hanyalah rasio dari jumlah perkiraan "ya" dengan jumlah pengamatan "ya" (Wilks, 2019). Adapun bias score dapat dirumuskan sebagai berikut:

BIAS= (3.6)

FAR (*False Alarm Ratio*) adalah bagian dari prakiraan “ya” yang ternyata salah, atau proporsi prakiraan itu peristiwa yang gagal terwujud, nilai FAR menjadi lebih kecil disukai. FAR terbaik adalah nol, dan FAR terburuk adalah satu (Wilks, 2019). Adapun *false alarm ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

FAR= (3.7)

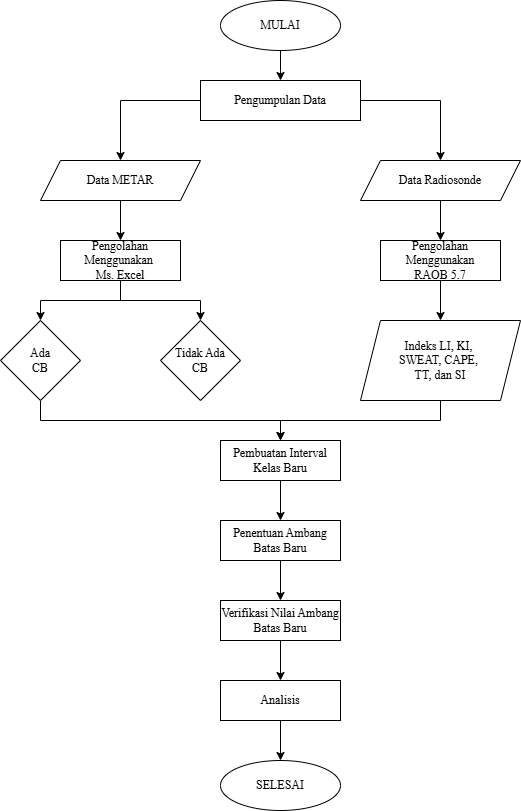
TSc (*Threat Score*) adalah alternatif dari proporsi yang benar sangat berguna ketika peristiwa yang akan diprakirakan (sebagai peristiwa "ya") lebih jarang terjadi daripada *non occurrence* (peristiwa "tidak") (Wilks, 2019). Adapun *threat score* dapat dirumuskan sebagai berikut:

TSc= (3.8)

POD (*Probability of Detection*) adalah sebuah perhitungan untuk mengetahui seberapa besar kejadian pengamatan „ya‟ diprakirakan benar terjadi(Wilks, 2019). Interval nilai antara 0 hingga 1 dengan nilai 1 adalah sempurna. Adapun Probability of Detection dapat dirumuskan sebagai berikut:

POD= (3.8)

**6. Diagram Alir Penelitian**



**Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian**

**BAB IV**

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**1. Interval Indeks Hasil Penelitian**

Setelah melakukan pengolahan data hasil pengamatan permukaan dan udara atas Stasiun Meteorologi Klas 1 Juanda dengan Metode Sturges (1926), data dari tahun 2018 sampai dengan tahun 2022 didapatkan interval kelas dari *Lifted Index* (LI), *K Index* (KI), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), *Total Total Index* (TT), dan *Showalter Index* (SI) yang kemudian akan digunakan untuk menentukan nilai ambang batas baru sebagai acuan atau dasar menentukan stabilitas atmosfer di wilayah Sidoarjo dan sekitarnya. Teknik verifikasi statistik yang mencakup metrik seperti *Accuracy*, *Bias*, *FAR* (False Alarm Ratio), *TS* (*Threat Score atau Critical Success Index*), dan *POD* (*Probability of Detection*) dikenal sebagai verifikasi prediksi kategorikal (*categorical forecast verification*). Teknik ini umum digunakan dalam meteorologi dan klimatologi untuk mengevaluasi kualitas prediksi biner, seperti kejadian hujan atau tidak hujan, dalam hal ini untuk memprakirakan apakah akan ada kejadian munculnya awan konvektif (*Cumulonimbus*) atau tidak. Hasil pengolahan selanjutnya dikelompokkan berdasarkan interval yang diperoleh dengan menggunakan metode Sturges (1926).

*a Interval Lifted Index (LI)*

Lifted Index (LI) merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan stabilitas atmosfer, terutama untuk mendeteksi potensi pembentukan awan konvektif seperti *Cumulonimbus* (Cb). Berdasarkan hasil pengolahan data radiosonde di Stasiun Meteorologi Kelas I Juanda pada periode 2018–2022, diperoleh distribusi interval kelas LI yang menggambarkan frekuensi kejadian awan *Cumulonimbus* pada dua waktu pengamatan utama, yaitu 00UTC (pukul 07.00 WIB) dan 12UTC (pukul 19.00 WIB). Tabel 4.1 menyajikan klasifikasi nilai LI pada masing-masing waktu tersebut.

**Tabel 4.1** **Pembagian interval indeks LI pada saat terdapat awan Cumulonimbus pada jam 00UTC dan 12UTC**



Pada Tabel 4.1, di waktu pengamatan jam 00UTC (07.00 WIB), tercatat sebanyak 706 kejadian awan Cumulonimbus. Mayoritas kejadian, yaitu 83.29%, berada pada interval kelas –4.2 hingga –0.7, disusul oleh kelas –7.8 hingga –4.3 sebanyak 76 kejadian (10.76%). Distribusi ini menunjukkan bahwa pada pagi hari, atmosfer di wilayah studi telah mengalami ketidakstabilan yang cukup signifikan, dan pembentukan awan *Cumulonimbus* cenderung terjadi saat nilai LI bernilai negatif. Hampir tidak ada kejadian Cb yang teramati pada nilai LI positif pada waktu ini, yang mengindikasikan bahwa kondisi atmosfer relatif stabil ketika nilai LI berada di atas nol. Sebaliknya, pada 12UTC (19.00 WIB), jumlah kejadian awan *Cumulonimbus* tercatat sebanyak 484 kasus, dengan distribusi kelas yang lebih menyebar dibandingkan pagi hari. Kelas dominan adalah –3.2 hingga –1.6 sebanyak 135 kejadian (27.89%), diikuti oleh kelas –4.8 hingga –3.3 (22.52%) dan –1.5 hingga 0.1 (22.31%). Menariknya, masih terdapat kejadian awan Cb pada kelas LI positif, khususnya interval 0.2 hingga 1.8, sebanyak 10 kejadian (2.07%), menandakan bahwa konveksi tetap dapat terjadi pada malam hari meskipun nilai LI tidak tergolong ekstrem. Perbedaan distribusi ini menunjukkan adanya karakteristik stabilitas atmosfer yang kontras antara pagi dan malam hari. Pada pukul 07.00 WIB (00UTC), pembentukan konveksi cenderung terjadi dalam kondisi atmosfer yang sangat labil (LI sangat negatif), sedangkan pada pukul 19.00 WIB (12UTC), proses konvektif dapat berlangsung meskipun indeks LI menunjukkan nilai yang lebih moderat. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh respon atmosfer terhadap akumulasi panas harian, sehingga walaupun nilai LI tidak terlalu rendah, kombinasi kelembapan dan sisa pemanasan permukaan dapat menciptakan kondisi cukup labil untuk membentuk awan Cumulonimbus. Dengan demikian, hasil ini menjadi landasan penting dalam menentukan nilai ambang baru LI untuk wilayah Surabaya dan sekitarnya.

*b. Interval K Index (KI)*

K Index (KI) merupakan salah satu indeks termodinamik yang mempertimbangkan suhu dan kelembapan pada lapisan troposfer bawah hingga menengah, dan banyak digunakan untuk mendeteksi potensi pembentukan badai petir atau awan konvektif. Berdasarkan hasil pengolahan data radiosonde di Stasiun Meteorologi Juanda selama tahun 2018–2022, diperoleh distribusi nilai KI pada saat terjadi awan Cumulonimbus (Cb) pada waktu pengamatan 00UTC (07.00 WIB) dan 12UTC (19.00 WIB), seperti disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2 Pembagian interval indeks KI pada saat terdapat awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC dan 12UTC**



Berdasarkan Tabel 4.2 di jam pengamatan 00UTC (07.00 WIB), jumlah kejadian Cb yang diamati sebanyak 706 kasus, dengan sebaran nilai KI yang cukup mencolok. Distribusi terbesar berada pada kelas 31 hingga 36.2, yaitu sebanyak 419 kejadian atau 59.22%, diikuti oleh kelas 36.3 hingga 41.5 dengan 153 kejadian (21.73%), dan kelas 25.7 hingga 30.9 sebanyak 92 kejadian (13.03%). Hal ini menunjukkan bahwa pada pagi hari, pembentukan awan *Cumulonimbus* paling sering terjadi ketika nilai KI berada dalam rentang 31 hingga 41, yang juga sejalan dengan nilai referensi Force (1990) yang menetapkan nilai KI > 30 sebagai ambang untuk kemungkinan terjadinya badai petir di atas 50%. Sementara itu, pada jam 12UTC (19.00 WIB), dari total 484 kejadian Cb, distribusi nilai KI menunjukkan penyebaran yang lebih merata pada kelas-kelas menengah. Kelas dominan berada pada rentang 23.0 hingga 27.6, dengan jumlah 75 kejadian (15.50%), disusul oleh 27.7 hingga 32.3 sebanyak 73 kejadian (15.08%), dan kelas 32.4 hingga 36.9 dengan 69 kejadian (14.26%). Meskipun masih ada kejadian pada kelas lebih tinggi seperti 36.9 hingga 41.5 (40 kejadian), dan bahkan hingga 45.8 hingga 49.4, kejadian ini menjadi semakin jarang.

Perbedaan distribusi nilai KI antara pagi dan malam hari menunjukkan bahwa pada jam 07.00 WIB (00UTC), atmosfer cenderung menunjukkan tingkat kelabilan yang tinggi, sehingga nilai KI yang besar menjadi indikator yang kuat terhadap potensi konveksi. Sementara itu, pada jam 19.00 WIB (12UTC), meskipun nilai KI yang lebih tinggi tetap mendukung terbentuknya awan Cb, tetapi kejadian konveksi dapat terjadi juga pada nilai KI yang lebih rendah, terutama pada kisaran KI < 30. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh pemanasan permukaan di siang hari yang berlanjut hingga malam, yang memperbesar ketidakstabilan lokal meskipun nilai KI tidak ekstrem. Dengan demikian, analisis interval ini menguatkan pentingnya penyesuaian ambang nilai KI secara lokal, dan menjadi dasar dalam penentuan nilai ambang baru.

*c. Interval Severe Weather Threat Index (SWEAT)*

Indeks SWEAT (*Severe Weather Threat Index*) merupakan salah satu parameter komposit yang dirancang untuk mendeteksi potensi terjadinya cuaca buruk berbasis konveksi, seperti badai petir dan awan *Cumulonimbus* (Cb). Indeks ini mempertimbangkan berbagai parameter termodinamik dan kinematik, seperti kelembapan, suhu, dan angin, sehingga sangat berguna untuk mengevaluasi tingkat kelabilan atmosfer. Berdasarkan hasil analisis data radiosonde di Stasiun Meteorologi Juanda selama periode 2018–2022, distribusi nilai indeks SWEAT pada saat terjadi awan *Cumulonimbus* dianalisis untuk dua waktu utama, yaitu 00UTC (pukul 07.00 WIB) dan 12UTC (pukul 19.00 WIB), sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.3. Pada waktu 00UTC (07.00 WIB), dari total 706 kejadian Cb, distribusi nilai SWEAT sangat terkonsentrasi pada kelas 193.4 hingga 225.7, yaitu sebanyak 362 kejadian atau 51.27% dari seluruh populasi. Kelas berikutnya adalah 161.0 hingga 193.3 sebanyak 124 kejadian (17.56%), dan 225.8 hingga 257.9 sebanyak 149 kejadian (21.10%). Distribusi ini menunjukkan bahwa nilai SWEAT pada pagi hari umumnya tidak harus mencapai ambang tinggi seperti yang disebutkan dalam literatur (misalnya SWEAT ≥ 300), namun sudah cukup untuk mendukung pembentukan awan konvektif pada kisaran 190–260.

**Tabel 4.3 Pembagian interval indeks SWEAT pada saat terdapat awan Cumulonimbus pada jam 00UTC dan 12UTC**



Sementara itu, pada Tabel 4.3 di waktu pengamatan jam 12UTC (19.00 WIB), jumlah kejadian awan Cb yang tercatat adalah 484 kasus, dengan dominasi kejadian pada kelas 172 hingga 224, yaitu sebanyak 229 kejadian (47.31%), disusul oleh kelas 224 hingga 276 sebanyak 141 kejadian (29.13%), dan 276 hingga 328 sebanyak 69 kejadian (14.26%). Kejadian konvektif dengan SWEAT < 172 atau > 328 sangat jarang terjadi, bahkan pada kelas 587 hingga 638, hanya tercatat 1 kejadian (0.21%). Distribusi nilai SWEAT ini menunjukkan bahwa, baik pada pagi maupun malam hari, mayoritas kejadian awan *Cumulonimbus* terjadi pada nilai SWEAT yang jauh di bawah ambang teoritis 250, yang secara umum digunakan untuk wilayah subtropis. Di wilayah tropis seperti Surabaya, nilai SWEAT yang moderat (170–260) sudah cukup sering dikaitkan dengan konveksi aktif. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh tingginya kelembapan dan suhu permukaan yang secara konsisten mendukung ketidakstabilan atmosfer tanpa memerlukan kombinasi parameter ekstrem. Dengan demikian, hasil analisis interval SWEAT ini mendukung perlunya penyesuaian ambang batas indeks secara lokal, agar lebih akurat dalam mendeteksi dan memprediksi potensi cuaca buruk akibat konveksi di wilayah tropis-maritim seperti Surabaya dan sekitarnya.

*d. Interval Convective Available Potential Energy Index (CAPE)*

Indeks CAPE (*Convective Available Potential Energy*) merupakan indikator penting dalam mendeteksi potensi konveksi atmosferik. Nilai CAPE menggambarkan besarnya energi potensial yang tersedia untuk parsel udara agar naik secara bebas; semakin tinggi nilai CAPE, semakin besar peluang terbentuknya awan konvektif seperti *Cumulonimbus* (Cb). Di wilayah tropis seperti Indonesia, nilai CAPE dapat sangat bervariasi, tergantung pada kondisi suhu permukaan, kelembapan, dan distribusi tekanan di atmosfer. Berdasarkan hasil analisis data radiosonde dari Stasiun Meteorologi Juanda selama tahun 2018–2022, distribusi nilai CAPE saat terjadi awan Cb dianalisis pada dua waktu utama, yaitu 00UTC (pukul 07.00 WIB) dan 12UTC (pukul 19.00 WIB), seperti ditampilkan dalam Tabel 4.4.

**Tabel 4.4 Pembagian interval indeks CAPE pada saat terdapat awan Cumulonimbus pada jam 00UTC dan 12UTC**



Menurut Tabel 4.4 di waktu pengamatan jam 00UTC (07.00 WIB), jumlah kejadian awan Cb tercatat sebanyak 706 kasus. Kelas dengan jumlah kejadian tertinggi adalah 598.2 hingga 1075, dengan 168 kejadian (23.80%), disusul oleh kelas –356 hingga 121 sebanyak 163 kejadian (23.09%), dan 121.1 hingga 598 sebanyak 126 kejadian (17.85%). Dengan demikian, sekitar 64.74% kejadian Cb terjadi pada nilai CAPE di bawah 1075 J/kg. Hal ini menunjukkan bahwa di pagi hari, konveksi dapat terbentuk dengan jumlah energi potensial yang relatif rendah. Sebaliknya, pada kelas CAPE di atas 2000 J/kg, frekuensi kejadian sangat kecil atau bahkan nihil, yang menunjukkan bahwa nilai CAPE yang sangat tinggi jarang tercapai pada pagi hari di wilayah ini. Sementara itu, pada waktu 12UTC (19.00 WIB), tercatat 484 kejadian Cb, dengan sebaran nilai CAPE yang cenderung mirip dengan pola pagi hari. Kelas dominan adalah 674 hingga 1666.7 sebanyak 136 kejadian (28.10%), diikuti oleh –318 hingga 674.3 sebanyak 119 kejadian (24.59%), dan 1666.7 hingga 2559.3 sebanyak 115 kejadian (23.76%). Kejadian awan Cb pada nilai CAPE > 3500 J/kg sangat jarang atau bahkan tidak ada, menunjukkan bahwa meskipun nilai CAPE siang hingga malam hari bisa lebih tinggi karena pemanasan maksimum, kejadian konveksi tetap lebih sering terjadi pada kisaran rendah hingga sedang. Perbandingan distribusi antara pagi dan malam hari memperlihatkan bahwa nilai CAPE yang moderat (sekitar 600–1700 J/kg) merupakan kisaran paling sering terkait dengan pembentukan awan konvektif di wilayah Surabaya dan sekitarnya. Hal ini mengindikasikan bahwa atmosfer tropis tidak selalu memerlukan nilai CAPE yang ekstrem untuk memicu konveksi, terutama ketika didukung oleh kelembapan tinggi dan konvergensi lokal. Dengan demikian, hasil ini menguatkan pentingnya evaluasi ambang nilai CAPE secara lokal, agar lebih sesuai dengan karakteristik atmosfer maritim-tropis, dan tidak sepenuhnya mengacu pada standar internasional seperti CAPE > 1000 atau > 2500 J/kg.

*e. Interval Total Total Index (TT)*

*Total Totals Index* (TT) merupakan salah satu indeks termodinamik klasik yang digunakan dalam memprediksi tingkat kelabilan atmosfer. Indeks ini merupakan hasil penjumlahan dari *Vertical Totals* dan *Cross Totals*, yang masing-masing menghitung perbedaan suhu dan kelembapan antar lapisan atmosfer. Nilai TT yang lebih tinggi biasanya menunjukkan kondisi atmosfer yang semakin tidak stabil dan mendukung pembentukan awan konvektif seperti *Cumulonimbus* (Cb).

Berdasarkan hasil pengolahan data *radiosonde* Stasiun Meteorologi Juanda selama periode 2018–2022, diperoleh distribusi nilai TT pada saat kejadian awan Cb untuk dua waktu pengamatan utama, yaitu 00UTC (pukul 07.00 WIB) dan 12UTC (pukul 19.00 WIB), sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.5.

**Tabel 4.5 Pembagian interval indeks TT pada saat terdapat awan Cumulonimbus pada jam 00UTC dan 12UTC**



Sesuai Tabel 4.5 di waktu pengamatan jam 00UTC (07.00 WIB), dari total 706 kejadian, distribusi nilai TT menunjukkan bahwa kelas 42.6 hingga 44.1 merupakan kelas dengan jumlah kejadian terbanyak, yaitu 250 kejadian (35.32%), diikuti oleh 44.2 hingga 45.7 sebanyak 176 kejadian (24.96%), dan 41.1 hingga 42.5 dengan 112 kejadian (15.89%). Jika ditotal, sekitar 76% kejadian Cb pada pagi hari terjadi saat nilai TT berada pada rentang 41.1 hingga 45.7, yang merupakan kisaran nilai menengah. Hal ini mengindikasikan bahwa pada pagi hari, kondisi atmosfer cukup responsif terhadap nilai TT yang tidak perlu mencapai ekstrem untuk memicu proses konvektif. Sementara itu, pada waktu 12UTC (19.00 WIB), dari 483 kejadian Cb, nilai TT menunjukkan dominasi pada kelas 43.2 hingga 44.5, sebanyak 267 kejadian (55.28%), diikuti oleh kelas 39.8 hingga 41.1 sebanyak 153 kejadian (31.68%), dan 41.2 hingga 42.5 sebanyak 30 kejadian (6.21%). Pola ini menunjukkan bahwa nilai TT yang sedikit lebih tinggi dari pagi hari lebih dominan memicu konveksi pada malam hari, khususnya di kisaran 43–45. Perbandingan kedua waktu menunjukkan bahwa nilai TT di antara 41 hingga 45 merupakan rentang paling aktif dalam mendukung terbentuknya awan konvektif di wilayah Surabaya. Namun, pada malam hari (12UTC), indeks TT yang sedikit lebih tinggi lebih sering terkait dengan kejadian Cb, yang dapat disebabkan oleh pelepasan panas laten yang masih tertahan di atmosfer setelah pemanasan maksimum pada siang hari. Secara umum, baik pada pagi maupun malam hari, nilai TT ekstrem (di atas 47 atau di bawah 38) sangat jarang berasosiasi dengan kejadian awan Cb, sehingga dapat dikatakan bahwa untuk wilayah tropis seperti Surabaya, indeks TT memberikan sinyal konvektif yang cukup efektif pada kisaran sedang.

*f. Interval Showalter Index (SI)*

Showalter Index (SI) adalah salah satu indeks konveksi yang digunakan untuk mengevaluasi stabilitas atmosfer, terutama dengan melihat kemampuan udara dari lapisan bawah untuk naik dan membentuk awan konvektif. Nilai SI yang lebih rendah, khususnya di bawah nol, umumnya mengindikasikan atmosfer yang lebih tidak stabil dan berpotensi menimbulkan konveksi kuat. Meskipun saat ini penggunaannya mulai tergeser oleh indeks lain yang lebih kompleks, SI tetap relevan sebagai indikator awal kestabilan atmosfer di wilayah tropis sesuai dengan yang terlihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

**Tabel 4.6 Pembagian interval indeks SI pada saat terdapat awan Cumulonimbus pada jam 00UTC dan 12UTC**



Di Tabel 4.6, pada waktu pengamatan jam 00UTC (07.00 WIB), dari total 706 kejadian Cb, kelas dengan kejadian terbanyak adalah –0.3 hingga 0.9 sebanyak 283 kejadian (40.14%), diikuti oleh kelas –1.6 hingga –0.4 sebanyak 166 kejadian (23.55%), serta 1.1 hingga 2.2 sebanyak 149 kejadian (21.13%). Komposisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar kejadian Cb terjadi saat SI bernilai netral hingga sedikit positif, yang mengindikasikan atmosfer dalam kondisi hampir labil.

Dibandingkan dengan pengamatan jam 12UTC, pola ini tampak berbeda karena dominasi kelas netral dan positif lebih menonjol pada pagi hari. Hal ini mungkin dipengaruhi oleh fase awal pemanasan permukaan yang belum maksimal, sehingga nilai SI belum menunjukkan ketidakstabilan ekstrem. Distribusi ini menunjukkan bahwa pada pagi hari, konveksi masih dapat terjadi meskipun SI bernilai sedikit positif, yang dapat dijelaskan oleh adanya kelembapan tinggi atau faktor labilitas lain yang tidak terwakili sepenuhnya oleh SI. Perbedaan pola distribusi SI antara pagi dan malam hari ini kembali menegaskan pentingnya evaluasi lokal terhadap nilai ambang SI, karena indeks ini memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap struktur vertikal suhu dan kelembapan. Dengan demikian, penerapan nilai ambang universal seperti SI ≤ 0 untuk menandai kondisi labil belum tentu mencerminkan dinamika atmosfer tropis secara akurat, termasuk di wilayah Stasiun Meteorologi Juanda. Di Tabel 4.6, pada waktu pengamatan jam 12UTC (19.00 WIB), dari total 484 kejadian Cb, kelas dengan kejadian terbanyak adalah –3.0 hingga –1.7 sebanyak 257 kejadian (53.32%), disusul oleh kelas –1.6 hingga –0.3 sebanyak 82 kejadian (17.01%), dan 0.9 hingga 2.2 sebanyak 66 kejadian (13.69%). Pola ini cukup berbeda dari pagi hari, karena pada malam hari lebih dari separuh kejadian Cb terjadi saat SI bernilai negatif cukup ekstrem. Hal ini menunjukkan bahwa atmosfer pada malam hari cenderung lebih tidak stabil, yang sejalan dengan teori bahwa konveksi lebih aktif saat SI berada di bawah nol. Dari distribusi ini dapat disimpulkan bahwa pada pagi hari (00UTC), nilai SI cenderung berada di kisaran netral hingga positif saat konveksi terjadi, sedangkan pada malam hari (12UTC), nilai SI menunjukkan ketidakstabilan yang lebih nyata dengan dominasi kelas negatif. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh peran pemanasan permukaan dan kelembapan sisa yang menambah energi konvektif pada malam hari, sehingga memperkuat pengaruh negatif dari nilai SI terhadap kejadian Cb. Temuan ini kembali menegaskan pentingnya adaptasi nilai ambang SI berdasarkan kondisi lokal, karena nilai ambang standar seperti SI ≤ 0 tidak sepenuhnya relevan untuk wilayah tropis yang memiliki profil termodinamik khas.

**2. Penentuan Nilai Ambang Baru**

Penentuan nilai ambang batas berdasarkan pada nilai batas atas dan batas bawah pada nilai kelas yang sering muncul (Supranto, 2008). Pada penelitian ini untuk masing-masing indeks telah dibagi berdasarkan pada masing-masing kelas dengan menggunakan metode Sturges(1926). Nilai ambang batas untuk indeks 4.1. Tiap-tiap indeks dibagi lagi menjadi 2 kategori yaitu pada pengamatan radiosonde jam 00UTC dan 12UTC karena pada pengamatan jam 00UTC dan 12UTC sesuai dengan data penelitian terdapat perbedaan yang sangat mencolok terkait indeks yang digunakan sebagai dasar menentukan stabilitas atmosfer.

*a. Penentuan Nilai Ambang Baru Lifted Index (LI)*

Penentuan nilai ambang batas baru untuk indeks Lifted Index (LI) dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif berdasarkan distribusi frekuensi kelas saat kejadian awan *Cumulonimbus* (Cb). Sesuai dengan prinsip yang dikemukakan oleh Supranto (2008), nilai ambang diambil dari batas atas kelas dengan jumlah kejadian terbanyak (modus), karena semakin kecil atau semakin negatif nilai LI, maka semakin labil kondisi atmosfer yang tercermin.

1. Penentuan nilai ambang baru *Lifted* *Index* (LI) Jam 00UTC akan disajikan pada Tabel 4.7 berikut ini:

**Tabel 4.7** **Distribusi Statistik Deskriptif Lifted Index (LI) pada Jam 00UTC**



Sebagaimana disajikan pada Tabel 4.7, data selama periode penelitian, tercatat 706 kejadian awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC (07.00 WIB). Nilai indeks LI minimum yang ditemukan adalah –7.8, dan nilai maksimum mencapai 27.2. Berdasarkan distribusi frekuensi pada Tabel 4.1 (kiri), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah –4.2 hingga –0.7, dengan total 588 kejadian (83.29%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru ditetapkan sebesar –0.7, yaitu batas atas dari kelas dominan tersebut. Jika dibandingkan dengan nilai ambang yang dikemukakan oleh Force (1990), yaitu bahwa kemungkinan terjadinya badai petir meningkat ketika LI < –3, maka nilai ambang yang diperoleh dari penelitian ini (–0.7) menunjukkan selisih yang signifikan, atau dapat dikatakan jauh lebih tinggi (kurang negatif). Temuan ini memperlihatkan bahwa di wilayah tropis seperti Surabaya, kejadian awan konvektif dapat terjadi meskipun nilai LI tidak terlalu negatif, yang mengindikasikan karakteristik ketidakstabilan atmosfer yang khas di wilayah tropis-maritim.

1. Distribusi statistik deskriptif nilai indek LI jam 12UTC (19.00WIB) untuk penentuan nilai ambang baru disajikan pada Tabel 4.8 berikut ini:

**Tabel 4.8 Distribusi Statistik Deskriptif Lifted Index (LI) pada Jam 12UTC**



Pada Tabel 4.8 di waktu pengamatan jam 12UTC (19.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat adalah sebanyak 484 kasus. Nilai LI minimum yang diperoleh dari data adalah –15.1, sedangkan nilai maksimum adalah 0.7. Mengacu pada Tabel 4.1 (kanan), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah –3.2 hingga –1.6, dengan total 135 kejadian (27.89%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru ditetapkan sebesar –1.6, yaitu batas atas dari kelas dominan. Jika dibandingkan dengan nilai referensi Force (1990) yaitu LI < –3, maka nilai ambang –1.6 yang diperoleh dari hasil penelitian ini juga berbeda cukup jauh, namun mencerminkan kenyataan bahwa konveksi di wilayah Surabaya dapat terjadi meskipun nilai LI tidak menunjukkan kelabilan ekstrem. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan pengaruh parameter lain seperti kelembapan tinggi, pemanasan permukaan, atau konvergensi lokal yang tidak ditangkap secara langsung oleh indeks LI. Dengan demikian, nilai ambang baru indeks LI yang diperoleh dari penelitian ini, yaitu –0.7 untuk jam 00UTC dan –1.6 untuk jam 12UTC, menggambarkan karakteristik lokal atmosfer tropis yang cenderung lebih cepat mengalami konveksi meskipun nilai LI tidak serendah yang diasumsikan oleh standar global.

*b. Penentuan Nilai Ambang Baru K Index (KI)*

Penentuan nilai ambang baru indeks K (KI) dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif berdasarkan distribusi frekuensi nilai KI saat terjadi awan *Cumulonimbus* (Cb). Sesuai dengan pendekatan yang dikemukakan oleh Supranto (2008), nilai ambang ditetapkan berdasarkan batas bawah dari kelas dengan frekuensi kejadian tertinggi (modus). Pemilihan batas bawah sebagai ambang baru bertujuan untuk mendeteksi secara dini potensi ketidakstabilan atmosfer, mengingat semakin tinggi nilai KI, maka semakin besar kemungkinan atmosfer dalam kondisi labil.

1. Gambaran distribusi statistik untuk menentukan nilai ambang batas baru *K* *Index* (KI) Jam 00UTC ditampilkan pada Tabel 4.9 berikut:

**Tabel 4.9 Distribusi Statistik Deskriptif K Index (KI) Pada Jam 00UTC**



Tabel 4.9 menunjukkan statistik deskriptif indeks KI pada jam 00UTC (07.00 WIB). Berdasarkan data selama periode penelitian, tercatat sebanyak 706 kejadian awan Cumulonimbus. Nilai KI minimum yang ditemukan adalah –11.4, sedangkan nilai maksimum adalah 40.9. Berdasarkan Tabel 4.2 (kiri), kelas dengan frekuensi tertinggi adalah 31 hingga 36.2, dengan jumlah kejadian sebanyak 419 kasus atau 59.22% dari total kejadian. Oleh karena itu, nilai ambang batas baru ditetapkan sebesar 31.0, yang merupakan batas bawah dari kelas dominan tersebut. Jika dibandingkan dengan nilai ambang teoritis yang dikemukakan oleh Force (1990), yaitu badai petir kemungkinan besar terjadi pada rentang nilai KI ≥ 31–35, maka nilai ambang yang diperoleh dari penelitian ini konsisten dengan standar tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan nilai ambang KI sebesar 31.0 pada jam 00UTC telah sesuai dan dapat dipertahankan dalam operasional, serta memperkuat validitas indeks ini dalam mendeteksi ketidakstabilan atmosfer di wilayah Surabaya pada pagi hari.

1. Penentuan nilai ambang baru *K* *Index* (KI) Jam 12UTC digambarkan pada distribusi statistik seperti Tabel 4.10 berikut:

**Tabel 4.10 Distribusi Statistik Deskriptif K Index (KI) pada Jam 12UTC**



Tabel 4.10 menyajikan statistik deskriptif indeks KI pada jam 12UTC (19.00 WIB). Selama periode pengamatan, tercatat sebanyak 484 kejadian awan Cumulonimbus. Nilai minimum indeks KI tercatat sebesar 12.5, sedangkan nilai maksimum adalah 48.3. Berdasarkan distribusi pada Tabel 4.2 (kanan), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah 27.3 hingga 30.9, yaitu sebanyak 363 kasus atau 75.00% dari total kejadian. Oleh karena itu, nilai ambang batas baru untuk indeks KI pada jam 12UTC ditetapkan sebesar 27.3, sebagai batas bawah kelas dominan tersebut. Nilai ini lebih rendah dibandingkan ambang yang dikemukakan oleh Force (1990), yaitu ≥31. Penurunan nilai ambang ini menunjukkan bahwa pada malam hari, atmosfer di wilayah studi cenderung menunjukkan tanda-tanda ketidakstabilan lebih awal, bahkan saat nilai KI belum mencapai standar global. Hal ini memperkuat pentingnya kalibrasi nilai ambang secara lokal berdasarkan kondisi klimatologis dan dinamika atmosfer wilayah tropis-maritim. Dengan demikian, nilai ambang batas baru KI yang ditentukan dalam penelitian ini, yaitu 31.0 pada jam 00UTC dan 27.3 pada jam 12UTC, dinilai lebih representatif terhadap kondisi aktual dan dapat diadopsi dalam sistem deteksi dini potensi cuaca signifikan di wilayah Surabaya dan sekitarnya.

*c. Penentuan Nilai Ambang Baru Severe Weather Threat Index (SWEAT)*

Penentuan nilai ambang batas baru untuk *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) dilakukan berdasarkan distribusi frekuensi nilai indeks saat kejadian awan Cumulonimbus (Cb) dengan menggunakan pendekatan statistik deskriptif. Sesuai dengan prinsip yang dikemukakan oleh Supranto (2008), nilai ambang ditentukan berdasarkan batas bawah dari kelas dengan frekuensi kejadian tertinggi (modus). Hal ini dipilih karena semakin tinggi nilai indeks SWEAT, maka semakin besar potensi ketidakstabilan atmosfer dan kemungkinan terjadinya cuaca ekstrem.

1. Penentuan nilai ambang baru *Severe Weather Threat Index* (SWEAT)Jam 00UTC (07.00WIB) digambarkan di Tabel 4.11 di bawah:

**Tabel 4.11 Distribusi Statistik Deskriptif SWEAT Index pada jam 00UTC**



Pada Tabel 4.11 merupakan hasil pengolahan data pada jam 00UTC (07.00 WIB), tercatat sebanyak 706 kejadian awan Cumulonimbus selama periode penelitian. Nilai SWEAT minimum yang tercatat adalah 34.4, sedangkan nilai maksimum adalah 351.5. Distribusi kelas pada Tabel 4.3 (kiri) menunjukkan bahwa kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah 193.4 hingga 225.1, dengan total 363 kejadian (51.42%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru ditetapkan sebesar 193.4, yang merupakan batas bawah dari kelas dominan tersebut. Jika dibandingkan dengan nilai ambang teoritis yang dikemukakan oleh Zakir (2010), yang menyatakan bahwa potensi badai meningkat ketika nilai SWEAT > 250, maka hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Nilai ambang 193.4 jauh lebih rendah dari acuan internasional, namun justru lebih representatif terhadap kondisi lokal. Hal ini mengindikasikan bahwa di wilayah tropis seperti Surabaya, cuaca konvektif signifikan dapat terjadi pada nilai SWEAT yang lebih rendah, terutama saat kelembapan dan suhu permukaan mendukung pembentukan ketidakstabilan.

1. Tabel 4.12 merupakan Gambaran distribusi statistik untuk penentuan nilai ambang baru *Severe Weather Threat Index* (SWEAT)Jam 12UTC.

**Tabel 4.12 Distribusi Statistik Deskriptif SWEAT Index pada Jam 12UTC.**



Pada waktu pengamatan 12UTC (19.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat adalah 484 kasus. Nilai indeks minimum tercatat sebesar 120.4, dan nilai maksimum adalah 637.8, sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.12. Distribusi frekuensi pada Tabel 4.3 (kanan) menunjukkan bahwa kelas dengan frekuensi tertinggi adalah 224 hingga 275.7, dengan jumlah kejadian sebanyak 232 kasus (47.93%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru indeks SWEAT untuk jam 12UTC ditetapkan sebesar 224, sebagai batas bawah dari kelas dengan jumlah kejadian terbanyak. Nilai ini kembali lebih rendah dibandingkan ambang referensi SWEAT > 250 menurut Zakir (2010). Temuan ini konsisten dengan karakteristik atmosfer tropis-maritim di wilayah Surabaya, di mana kondisi konvektif seringkali dipicu oleh kombinasi kelembapan tinggi dan pemanasan permukaan yang kuat, tanpa harus menunggu nilai SWEAT mencapai tingkat ekstrem seperti pada wilayah lintang sedang. Dengan demikian, nilai ambang baru indeks SWEAT yang diperoleh dari penelitian ini, yaitu 193.4 untuk jam 00UTC dan 224 untuk jam 12UTC, diharapkan dapat meningkatkan sensitivitas peringatan dini terhadap potensi cuaca signifikan yang berbasis konveksi, khususnya di wilayah tropis Indonesia.

*D. Penentuan Nilai Ambang Baru Convective Available Potential Energy Index (CAPE)*

Convective Available Potential Energy (CAPE) adalah indeks penting dalam meteorologi konveksi yang menunjukkan jumlah energi potensial yang tersedia bagi parcel udara untuk naik secara bebas. Semakin tinggi nilai CAPE, semakin besar kemungkinan terbentuknya awan konvektif kuat seperti Cumulonimbus. Dalam penelitian ini, penentuan ambang batas dilakukan berdasarkan batas bawah dari kelas dengan jumlah kejadian terbanyak (modus), mengikuti metode statistik yang dikemukakan oleh Supranto (2008).

1. Gambaran distribusi statistik *Convective Available Potential Energy* *Index* (CAPE) Jam 00UTC ditampilkan pada Tabel 4.13 di bawah ini:

**Tabel 4.13 Distribusi Statistik Deskriptif CAPE Index Pada Jam 00UTC**



Berdasarkan Tabel 4.13, pada jam 00UTC (07.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat selama periode penelitian adalah sebanyak 706 kasus. Nilai CAPE minimum yang tercatat adalah –356 J/kg, dan nilai maksimum mencapai 4290 J/kg, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.13. Distribusi frekuensi pada Tabel 4.4 (kiri) menunjukkan bahwa kelas dominan adalah –356 hingga 121 J/kg, dengan jumlah kejadian sebanyak 163 kasus (23.09%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru untuk indeks CAPE pada jam 00UTC ditetapkan sebesar 121 J/kg, yaitu batas bawah dari kelas dominan berikutnya (121.1–598.2). Hal ini dikarenakan kelas pertama mencakup nilai negatif yang secara fisik tidak selalu relevan sebagai energi konvektif. Nilai ambang 121 J/kg ini secara signifikan lebih rendah dari ambang CAPE ≥ 1000 J/kg yang biasa digunakan dalam prakiraan cuaca di wilayah lintang sedang. Temuan ini mengindikasikan bahwa di wilayah tropis seperti Surabaya, konveksi dapat terbentuk pada nilai CAPE yang jauh lebih rendah, karena faktor kelembapan dan suhu permukaan yang tinggi telah cukup untuk menciptakan ketidakstabilan meskipun nilai energi konvektifnya relatif kecil.

1. Penentuan nilai ambang baru *Convective Available Potential Energy* *Index* (CAPE) Jam 12UTC akan dijelaskan berdasar data pada Tabel 4.14 berikut:

**Tabel 4.14 Distribusi Statistik Deskriptif CAPE Index pada Jam 12UTC**



Pada jam 12UTC (19.00 WIB), total kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat adalah 484 kasus. Nilai minimum indeks CAPE tercatat sebesar –318 J/kg, dan nilai maksimum mencapai 5634.3 J/kg, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4.14. Berdasarkan Tabel 4.4 (kanan), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah 674.3 hingga 1666.7 J/kg, dengan total 136 kasus (28.10%). Maka, nilai ambang batas baru ditetapkan sebesar 674.3 J/kg, yaitu batas bawah dari kelas dominan tersebut. Nilai ini menunjukkan bahwa pada malam hari, energi konvektif cenderung lebih tinggi dibanding pagi hari, kemungkinan besar akibat sisa pemanasan siang hari yang memperbesar ketidakstabilan atmosfer. Meski demikian, nilai ini masih di bawah standar global seperti yang digunakan dalam prakiraan badai di wilayah subtropis (misalnya CAPE > 2000 J/kg), namun sudah cukup untuk memicu kejadian konvektif di wilayah tropis. Dengan demikian, ambang batas CAPE hasil penelitian ini yaitu 121 J/kg pada jam 00UTC dan 674.3 J/kg pada jam 12UTC, memberikan gambaran realistis mengenai kondisi atmosfer lokal, dan dapat menjadi acuan peringatan dini yang lebih tepat guna di wilayah tropis-maritim seperti Surabaya dan sekitarnya.

*e. Penentuan Nilai Ambang Baru Total Total Index (TT)*

Indeks Total Totals (TT) merupakan salah satu indeks konveksi yang sederhana namun efektif dalam mendeteksi potensi kelabilan atmosfer. Indeks ini diperoleh dari penjumlahan antara *Vertical Totals* dan *Cross Totals*, yang mencerminkan perbedaan suhu dan kelembapan antar lapisan troposfer bawah. Dalam penelitian ini, penentuan nilai ambang dilakukan berdasarkan nilai batas bawah dari kelas dengan jumlah kejadian tertinggi, sesuai metode yang dikemukakan oleh Supranto (2008), mengingat semakin tinggi nilai TT menunjukkan atmosfer yang semakin tidak stabil.

1. Gambaran distribusi statistik yang digunakan untuk penentuan nilai ambang baru *Total Total* *Index* (TT) Jam 00UTC dapat dilihat pada Tabel 4.15:

**Tabel 4.15 Distribusi Statistik Deskriptif Total Total Index (TT) pada Jam 00UTC**



Berdasarkan data jam 00UTC (07.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat selama periode penelitian mencapai 706 kasus. Nilai indeks TT minimum yang tercatat adalah 33.0, sedangkan nilai maksimum mencapai 48.3, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.15. Distribusi nilai pada Tabel 4.5 (kiri) menunjukkan bahwa kelas dengan frekuensi tertinggi adalah 42.6 hingga 44.1, dengan jumlah kejadian sebanyak 249 kasus (35.32%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru untuk indeks TT jam 00UTC ditetapkan sebesar 42.6, yaitu batas bawah dari kelas dominan tersebut. Jika dibandingkan dengan nilai ambang yang dikemukakan oleh Force (1990), di mana kelabilan sedang berada pada rentang 45–55, maka nilai ambang 42.6 yang diperoleh dari hasil penelitian ini tergolong lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa di wilayah tropis seperti Surabaya, konveksi dapat terjadi meskipun nilai TT belum mencapai rentang kelabilan sedang menurut acuan lintang sedang. Fenomena ini menunjukkan pentingnya penyesuaian ambang berdasarkan karakteristik atmosfer lokal.

1. Penentuan nilai ambang baru *Total Total* *Index* (TT) Jam 12UTC dapat dilihat berdasarkan gambaran deskripsi statistik seperti Tabel 4.16 berikut:

**Tabel 4.16 Distribusi Statistik Deskriptif Total Total Index (TT) pada Jam 12UTC**



Pada jam 12UTC (19.00 WIB), tercatat 484 kejadian awan Cumulonimbus selama periode pengamatan. Nilai minimum indeks TT adalah 36.4, dan nilai maksimum mencapai 69.2, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.16. Berdasarkan distribusi kelas dalam Tabel 4.5 (kanan), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah 43.2 hingga 46.5, dengan 267 kasus (55.28%). Maka, nilai ambang batas baru untuk indeks TT pada jam 12UTC ditetapkan sebesar 43.2, sebagai batas bawah dari kelas dominan. Nilai ambang ini kembali lebih rendah dibandingkan standar Force (1990), yang menyebutkan rentang 45–55 untuk kelabilan sedang. Namun demikian, nilai ini tetap relevan secara lokal, karena dalam kenyataannya kejadian awan konvektif aktif di Surabaya seringkali terjadi pada nilai TT di bawah ambang teoritis tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa atmosfer tropis dapat lebih mudah menjadi tidak stabil akibat kelembapan tinggi dan faktor pemanasan yang kuat meskipun indeks TT belum tergolong ekstrem. Dengan demikian, nilai ambang batas indeks TT yang ditentukan dalam penelitian ini adalah 42.6 pada jam 00UTC dan 43.2 pada jam 12UTC, yang secara empiris terbukti lebih mencerminkan kondisi nyata atmosfer di wilayah tropis, dan dapat digunakan sebagai acuan operasional dalam sistem deteksi dini potensi konveksi.

*f. Penentuan Nilai Ambang Baru Showalter Index (SI)*

Showalter Index (SI) merupakan salah satu indeks konveksi yang digunakan untuk mengukur tingkat stabilitas atmosfer dengan menghitung perbedaan suhu antara parcel udara yang dinaikkan secara adiabatik dari lapisan 850 hPa ke 500 hPa dan suhu lingkungan di ketinggian 500 hPa. Nilai SI yang lebih rendah (terutama yang bernilai negatif) menunjukkan atmosfer yang lebih tidak stabil. Dalam penelitian ini, nilai ambang ditentukan berdasarkan batas atas dari kelas dengan frekuensi kejadian terbanyak (modus), sebagaimana dijelaskan oleh Supranto (2008), karena semakin kecil nilai SI, maka semakin besar potensi ketidakstabilan atmosfer.

1. Penentuan Nilai Ambang Baru *Showalter* *Index* (SI) Jam 00UTC berdasarkan Tabel 4.17 berikut:

**Tabel 4.17 Distribusi Statistik Deskriptif Showalter Index (SI) pada Jam 00UTC**



Pada jam 00UTC (07.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus yang tercatat selama periode penelitian adalah 706 kasus. Nilai SI minimum yang tercatat adalah –2.9, sedangkan nilai maksimum adalah 9.3, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.17. Distribusi frekuensi pada Tabel 4.6 (kiri) menunjukkan bahwa kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah –0.3 hingga 0.9, dengan total 283 kejadian (40.08%). Oleh karena itu, nilai ambang batas baru untuk indeks SI pada jam 00UTC ditetapkan sebesar 0.9, yaitu batas atas dari kelas dominan tersebut.

Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan ambang batas yang dikemukakan oleh Force (1990), yaitu antara 0 hingga –3, yang menunjukkan kondisi kelabilan sedang. Hal ini menunjukkan bahwa di wilayah tropis seperti Surabaya, awan konvektif dapat terbentuk meskipun SI masih berada di nilai positif, yang secara teoritis dianggap stabil. Temuan ini mengindikasikan perlunya penyesuaian nilai ambang SI secara lokal agar dapat mencerminkan realitas dinamika atmosfer wilayah tropis dengan lebih akurat.

1. Deskripsi distribusi statistik untuk *Showalter* *Index* (SI) Jam 12UTC dapat dilihat pada Tabel 4.18 berikut:

**Tabel 4.18 Distribusi Statistik Deskriptif Showalter Index (SI) pada Jam 12UTC**



Pada jam 12UTC (19.00 WIB), jumlah kejadian awan Cumulonimbus tercatat sebanyak 484 kasus. Nilai indeks SI minimum adalah –13.8, sedangkan nilai maksimum mencapai 5.8, sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 4.18. Berdasarkan distribusi dalam Tabel 4.6 (kanan), kelas dengan jumlah kejadian terbanyak adalah –1.2 hingga 0.8, dengan 257 kejadian (53.10%). Maka, nilai ambang batas baru SI untuk jam 12UTC ditetapkan sebesar 0.8, yaitu batas atas dari kelas dominan tersebut. Nilai ini juga lebih tinggi dari ambang teoritis Force (1990), dan serupa dengan hasil pada jam 00UTC. Hal ini menegaskan bahwa konveksi di wilayah tropis tidak selalu terjadi pada nilai SI yang sangat rendah, dan bahwa indeks ini perlu ditafsirkan secara kontekstual berdasarkan lokasi dan kondisi lokal. Dengan demikian, nilai ambang batas baru indeks SI yang diperoleh dalam penelitian ini adalah 0.9 untuk jam 00UTC dan 0.8 untuk jam 12UTC, yang secara empiris telah menunjukkan kecocokan dengan kejadian Cb di wilayah pengamatan. Hasil ini diharapkan dapat memperbaiki sensitivitas sistem peringatan dini cuaca berbasis indeks konvektif di lingkungan tropis Indonesia.

**3. Nilai Ambang Baru**



Pada Tabel 4.19 dapat kita lihat bahwa nilai-nilai tersebut merupakan nilai ambang batas baru yang diperoleh dari hasil penelitian. Nilai ambang baru pada saat kejadian awan Cumulonimbus pada jam 00UTC untuk *Lifted Index* (LI) berada pada nilai -0.7, *K Index* (KI) berada pada nilai 31, *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) berada pada nilai 193.35 (194),  *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE) berada pada nilai 121.05, *Total Total Index* (TT) berada pada nilai 42.55, *Showalter Index* (SI) berada pada nilai 0.95. Nilai ambang baru pada saat kejadian awan Cumulonimbus pada jam 12UTC untuk *Lifted Index* (LI) berada pada nilai -1.6, *K Index* (KI) berada pada nilai 27.3, *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) berada pada nilai 223.95 (224),  *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE) berada pada nilai 674.35, *Total Total Index* (TT) berada pada nilai 43.15, *Showalter Index* (SI) berada pada nilai 0.80.

**4. Verifikasi**

Kegiatan verifikasi dilakukan pada 6 indeks sebagai obyek penelitian, yaitu *Lifted Index* (LI), *K Index* (KI), *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), *Convective Available Potential Energy Index* (CAPE), *Total Total Index* (TT), dan *Showalter Index* (SI). Verifikator yang digunakan adalah data dari Meteorological Aerodrome Report (Metar) selama periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) tahun 2023 dan periode Maret, April, dan Mei (MAM) tahun 2023. Tujuan daripada verifikasi ini adalah untuk mengetahui akurasi dari masing-masing indeks obyek penelitian. Nilai ambang yang diverifikasi adalah ambang batas awal dan ambang batas baru pada saat munculnya awan *Cumulonimbus* seperti terlihat pada Tabel 4.20 sebagai asumsi bahwa pada saat itu kondisi atmosfer adalah labil dengan menggunakan metode Sturges (1926) untuk masing-masing indeks penelitian. Verifikasi selanjutnya menggunakan metode dikotomi dengan menggunakan tabel kontingensi 2x2.



*a. Verifikasi Lifted Index (LI) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks LI pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada Tabel 4.21.

**Tabel 4.21** **Verifikasi indeks LI dengan awan Cumulonimbus pada jam 00UTC**



**Gambar 4.1** Grafik verifikasi indeks LI dengan awan Cumulonimbus jam00 UTC

Sesuai Tabel 4.21 dan Gambar 4.1 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Nilai akurasi meningkat secara signifikan dari 0.461 (awal) menjadi 0.728 (baru). Hal ini menunjukkan bahwa sistem klasifikasi pada ambang baru mampu mengenali kejadian awan *Cumulonimbus* dan bukan kejadian awan *Cumulonimbus* dengan lebih baik. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa ambang -3 terlalu konservatif dan menyebabkan banyak kejadian konvektif tidak terdeteksi. Perubahan ambang nilai menghasilkan deteksi yang lebih presisi.

* Bias

Bias meningkat dari 0.524 menjadi 1.227. Nilai bias > 1 menunjukkan bahwa metode dengan nilai ambang LI baru cenderung *over-forecasting*, yaitu memprediksi terlalu banyak kejadian dibandingkan kenyataan serta bisa meningkatkan jumlah peringatan palsu. Namun, peningkatan ini bisa ditoleransi jika dibarengi dengan peningkatan POD dan TSc.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR mengalami penurunan dari 0.273 menjadi 0.248, yang berarti rasio kesalahan deteksi (*false alarm*) menurun. Ini menunjukkan bahwa LI baru lebih efisien dalam meminimalkan kejadian yang salah diprediksi (*false alarm*).

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat secara signifikan dari 0.333 menjadi 0.707. *Threat Score* mengukur keseimbangan antara deteksi benar dan kesalahan, sehingga peningkatan ini menandakan bahwa ambang baru meningkatkan kemampuan sistem untuk mengenali kejadian aktual. Ini menunjukkan perbaikan besar dari segi keseimbangan antara deteksi benar dan kesalahan prediksi.

* *Probability of Detection* (POD)

POD meningkat drastis dari 0.381 menjadi 0.922. Artinya, kemampuan sistem dalam mendeteksi kejadian nyata meningkat sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa LI = –0.7 lebih responsif dalam mendeteksi kondisi labil yang memicu konveksi dan timbulnya awan *Cumulonimbus*. Ini sangat mendukung implementasi sistem peringatan dini yang lebih tanggap.

*b. Verifikasi Lifted Index (LI) pada jam 12UTC*

**Tabel 4.22 Verifikasi indeks LI dengan awan Cumulonimbus pada jam 12UTC**



**Gambar 4.2** Grafik verifikasi indeks LI dengan awan Cumulonimbus jam12 UTC

Berdasarkan Tabel 4.22 dan Gambar 4.2 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi sedikit meningkat dari 0.574 pada ambang batas LI awal menjadi 0.601 pada ambang batas LI yang baru, yang menunjukkan bahwa pada waktu malam, perubahan ambang juga memberikan peningkatan dalam klasifikasi kejadian secara umum, meski tidak sebesar Jam 00.

* Bias

Bias meningkat dari 1.202 menjadi 1.505. Sama seperti analisis sebelumnya, hal ini menunjukkan kecenderungan over-forecasting yang lebih besar pada ambang baru. Hal ini perlu diperhatikan untuk menghindari terlalu banyak peringatan yang tidak perlu.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR mengalami sedikit kenaikan dari 0.384 menjadi 0.392. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun deteksi meningkat, sistem juga sedikit lebih sering memberikan alarm palsu.

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat dari 0.507 menjadi 0.575. Kenaikan ini lebih kecil dibandingkan waktu Jam 00, namun tetap menunjukkan perbaikan performa sistem dalam mengenali kejadian cuaca signifikan.

* *Probability of Detection* (PoD)

PoD naik dari 0.740 menjadi 0.914, menandakan peningkatan kemampuan sistem dalam mendeteksi kejadian konvektif nyata. Ini menunjukkan bahwa LI = –1.6 cukup efektif untuk malam hari.

*c. Verifikasi K Index (KI) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks KI pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.23.

**Tabel 4.23 Verifikasi indeks KI dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC**



**Gambar 4.3** Grafik verifikasi indeks KI dengan awan *Cumulonimbus* jam00 UTC

Menurut Tabel 4.23 dan Gambar 4.3 tidak ada perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Nilai akurasi tetap sama, yaitu 0.719 baik pada ambang awal maupun ambang baru. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun evaluasi dilakukan ulang, ambang nilai 31 tetap optimal dalam membedakan antara kejadian dan bukan kejadian konvektif pada jam 00 UTC. Tidak ada peningkatan atau penurunan performa sistem klasifikasi.

* Bias

Nilai bias juga tetap di angka 0.984, mengindikasikan sistem cukup seimbang antara jumlah kejadian yang diprediksi dan kejadian nyata. Tidak ada kecenderungan overforecasting maupun underforecasting.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR juga tidak berubah, yaitu 0.194, artinya tidak ada peningkatan jumlah alarm palsu. Nilai ini tergolong rendah dan mendukung stabilitas sistem dalam menjaga efisiensi prediksi.

* *Threat Score* (TSc)

Nilai TSc tetap 0.667, menunjukkan efektivitas sistem dalam mendeteksi kejadian konvektif masih terjaga dengan baik. Skor ini menunjukkan performa yang andal dan konsisten dalam lingkungan evaluasi ulang.

* *ProbabiKIty of Detection* (POD)

POD juga tetap di angka 0.794, mengindikasikan bahwa tingkat deteksi kejadian nyata cukup tinggi dan tetap konsisten antara evaluasi awal dan ulang.

*d. Verifikasi K Index (KI) pada jam 12UTC*

Verifikasi Indeks KI pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.24.

**Tabel 4.24 Verifikasi indeks KI dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC**



**Gambar 4.4** Grafik verifikasi indeks KI dengan awan *Cumulonimbus* jam12 UTC

Dari Tabel 4.24 dan Gambar 4.4 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi sedikit menurun dari 0.716 (awal) menjadi 0.699 (baru). Penurunan ini relatif kecil, namun mengindikasikan bahwa penurunan ambang batas ke 27.3 menyebabkan sistem sedikit menurunkan ketepatannya dalam mengklasifikasi antara kejadian dan bukan kejadian.

* Bias

Bias meningkat dari 1.269 ke 1.394, artinya sistem menjadi lebih overforecast (lebih banyak memprediksi kejadian dibandingkan kenyataan). Peningkatan ini dapat berdampak pada bertambahnya peringatan palsu.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR meningkat dari 0.295 menjadi 0.324, konsisten dengan peningkatan bias. Ini menandakan bahwa ambang baru cenderung meningkatkan jumlah alarm palsu, meskipun peningkatannya masih dalam batas toleransi.

* *Threat Score* (TSc)

TSc menurun sangat kecil dari 0.650 ke 0.649, perubahan yang dapat diabaikan. Ini menunjukkan bahwa meskipun ada penyesuaian ambang, efektivitas sistem tetap terjaga.

* *ProbabiKIty of Detection* (POD)

POD meningkat dari 0.894 menjadi 0.942, menunjukkan peningkatan sensitivitas sistem terhadap kejadian nyata. Artinya, lebih banyak kejadian konvektif berhasil dideteksi dengan ambang baru.

*e. Verifikasi Severe Weather Threat Index (SWEAT) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks SWEAT pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010) yang terdapat pada tabel 4.25.

**Tabel 4.25 Verifikasi indeks SWEAT dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC**



**Gambar 4.5** Grafik verifikasi indeks SWEAT dengan awan *Cumulonimbus* jam00 UTC

Sesuai Tabel 4.25 dan Gambar 4.5 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Nilai akurasi meningkat tajam dari 0.348 menjadi 0.685. Ini mencerminkan perbaikan signifikan pada sistem klasifikasi kejadian dan bukan kejadian setelah dilakukan penyesuaian ambang. Ambang awal terlalu tinggi sehingga banyak kejadian nyata tidak terdeteksi, yang kini berhasil dikompensasi oleh ambang baru.

* Bias

Bias naik drastis dari 0.111 menjadi 0.992, menunjukkan bahwa sebelumnya sistem sangat *underforecast* (terlalu sedikit memprediksi kejadian), namun kini menjadi hampir seimbang. Ini merupakan perkembangan positif, karena sistem tidak lagi mengabaikan potensi kejadian.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR mengalami sedikit kenaikan dari 0.143 ke 0.195, menandakan bahwa jumlah alarm palsu bertambah, namun masih dalam batas yang wajar dan sebanding dengan peningkatan deteksi nyata.

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat drastis dari hanya 0.094 menjadi 0.669, mencerminkan perbaikan luar biasa dalam efektivitas sistem mendeteksi kejadian cuaca ekstrem yang sesungguhnya.

* *ProbabiSWEATty of Detection* (POD)

POD melonjak dari 0.095 menjadi 0.798, artinya sistem kini mampu mendeteksi hampir 80% kejadian nyata, dibandingkan hanya sekitar 9% sebelumnya. Ini sangat krusial dalam konteks peringatan dini cuaca ekstrem.

*f. Verifikasi Severe Weather Threat Index (SWEAT) pada jam 12UTC*

Verifikasi Indeks SWEAT pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.26.

**Tabel 4.26 Verifikasi indeks SWEAT dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC**



**Gambar 4.6** Grafik verifikasi indeks SWEAT dengan awan *Cumulonimbus* jam12 UTC

Menurut Tabel 4.26 dan Gambar 4.6 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi meningkat dari 0.409 menjadi 0.602, menunjukkan adanya peningkatan kemampuan sistem dalam mengidentifikasi kejadian dan bukan kejadian konvektif di siang hari. Ini menunjukkan ambang baru lebih sesuai dengan kondisi aktual.

* Bias

Bias naik dari 0.192 menjadi 0.808, yang berarti sistem sebelumnya sangat *underforecast* dan kini mulai mendekati keseimbangan. Perubahan ini menunjukkan bahwa lebih banyak kejadian nyata berhasil diprediksi.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR turun dari 0.500 menjadi 0.298, menunjukkan bahwa jumlah alarm palsu berkurang secara signifikan. Ini adalah perkembangan yang sangat positif karena meningkatkan efisiensi sistem peringatan.

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat dari 0.088 menjadi 0.457, menunjukkan peningkatan substansial dalam kemampuan sistem untuk mendeteksi kejadian konvektif secara benar.

* *ProbabiSWEATty of Detection* (POD)

POD naik dari 0.096 menjadi 0.567, artinya sekarang lebih dari 50% kejadian nyata dapat terdeteksi, dibandingkan sebelumnya hanya sekitar 9%. Ini sangat meningkatkan nilai guna sistem dalam operasional peringatan dini.

*g. Verifikasi Convective Available Potential Energy Index (CAPE) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks CAPE pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010) yang terdapat pada tabel 4.27.

**Tabel 4.27 Verifikasi indeks CAPE dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC**



**Gambar 4.7** Grafik verifikasi indeks CAPE dengan awan *Cumulonimbus* jam00 UTC

Sesuai Tabel 4.27 dan Gambar 4.7 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi DeRubertis (2006). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi meningkat dari 0.474 menjadi 0.684, menunjukkan perbaikan yang signifikan dalam kemampuan sistem membedakan antara kejadian dan bukan kejadian konvektif. Ambang awal sebesar 1000 terlalu tinggi, sehingga sistem menjadi tidak sensitif terhadap kejadian nyata yang bernilai lebih rendah.

* Bias

Bias naik dari 0.536 menjadi 0.984, menunjukkan bahwa sistem prediksi sebelumnya cenderung *underforecast*. Setelah ambang diturunkan, nilai bias mendekati 1, menandakan bahwa jumlah prediksi kejadian menjadi seimbang dengan kejadian aktual, tanpa terlalu banyak memprediksi maupun mengabaikan kejadian.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR turun dari 0.239 menjadi 0.211, artinya jumlah alarm palsu sedikit menurun meskipun sistem lebih sensitif. Ini memperlihatkan peningkatan efisiensi sistem, karena mampu menambah deteksi tanpa menambah kesalahan prediksi secara signifikan.

* *Threat Score* (TSc)

TSc naik dari 0.362 menjadi 0.642, memperlihatkan peningkatan kemampuan sistem dalam mendeteksi kejadian aktual secara lebih akurat, dengan pengurangan kesalahan prediksi baik dalam bentuk *misses* maupun *false* *alarm*.

* *ProbabiCAPEty of Detection* (POD)

POD meningkat dari 0.408 ke 0.776, artinya kemampuan mendeteksi kejadian nyata meningkat hampir dua kali lipat. Ini sangat penting untuk peringatan dini terhadap potensi cuaca konvektif yang kuat..

*h. Verifikasi Convective Available Potential Energy Index (CAPE) pada jam 12UTC*

Verifikasi Indeks CAPE pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.28.

**Tabel 4.28 Verifikasi indeks CAPE dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC**



**Gambar 4.8** Grafik verifikasi indeks CAPE dengan awan *Cumulonimbus* jam12 UTC

Menurut data di Tabel 4.28 dan Gambar 4.8 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi DeRubertis (2006). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi sedikit meningkat dari 0.592 menjadi 0.598, perubahannya sangat kecil dan hampir tidak signifikan. Namun demikian, ini menunjukkan bahwa ambang baru sedikit lebih tepat dalam mendeteksi klasifikasi kejadian.

* Bias

Bias meningkat dari 1.067 menjadi 1.212, menunjukkan bahwa sistem mulai cenderung overforecast. Artinya, ada peningkatan jumlah prediksi kejadian yang tidak benar-benar terjadi.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR naik sedikit dari 0.351 ke 0.365, mendukung peningkatan bias. Hal ini perlu diperhatikan karena bisa berdampak pada peningkatan jumlah alarm palsu, meskipun masih dalam batas toleransi.

* *Threat Score* (TSc)

TSc naik dari 0.503 menjadi 0.533, menunjukkan bahwa sistem tetap mengalami peningkatan efektivitas dalam mendeteksi kejadian konvektif yang sesungguhnya, meskipun peningkatannya moderat.

* *ProbabiCAPEty of Detection* (POD)

POD sedikit naik dari 0.692 ke 0.769, namun tetap dalam kisaran tinggi. Ini menunjukkan bahwa ambang baru mampu menjaga atau sedikit meningkatkan sensitivitas sistem terhadap kejadian nyata.

*i. Verifikasi Total Total Index (TT) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks TT pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010) yang terdapat pada tabel 4.29.

**Tabel 4.29 Verifikasi indeks TT dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC**



**Gambar 4.9** Grafik verifikasi indeks TT dengan awan *Cumulonimbus* jam00 UTC

Menurut Tabel 4.29 dan Gambar 4.9 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Nilai akurasi meningkat dari 0.393 menjadi 0.640, menunjukkan bahwa sistem dengan ambang baru mampu secara lebih akurat membedakan antara kejadian dan bukan kejadian konvektif. Perubahan ini sangat signifikan dan memperlihatkan perbaikan besar dalam klasifikasi sistem.

* Bias

Bias meningkat dari 0.254 ke 0.857, menunjukkan bahwa sistem prediksi dengan ambang awal sangat *underforecasting*, hanya memprediksi sedikit kejadian dibanding kenyataan. Setelah ambang diturunkan, nilai bias mendekati 1, artinya jumlah kejadian yang diprediksi hampir sama dengan kejadian aktual.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR sedikit menurun dari 0.219 ke 0.213, yang berarti jumlah alarm palsu tetap terkendali meskipun sistem menjadi lebih sensitif. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sensitivitas tidak mengorbankan terlalu banyak ketepatan.

* *Threat Score* (TSc)

TSc naik tajam dari 0.188 menjadi 0.570, artinya sistem jauh lebih mampu mendeteksi kejadian aktual dengan ambang baru, menunjukkan peningkatan efektivitas secara drastis..

* *ProbabiTTty of Detection* (POD)

POD meningkat dari 0.198 ke 0.675, mengindikasikan bahwa tingkat keberhasilan dalam menangkap kejadian nyata meningkat lebih dari tiga kali lipat. Ini menunjukkan manfaat besar dalam penyesuaian ambang untuk sistem peringatan dini.

*j. Verifikasi Total Total Index (TT) pada jam 12UTC*

Verifikasi Indeks TT pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.30.

**Tabel 4.30 Verifikasi indeks TT dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC**



**Gambar 4.10** Grafik verifikasi indeks TT dengan awan *Cumulonimbus* jam12 UTC

Berdasarkan Tabel 4.30 dan Gambar 4.10 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi naik dari 0.472 menjadi 0.636, menunjukkan peningkatan kinerja klasifikasi dari sistem dengan ambang baru yang lebih baik. Ini memperlihatkan bahwa sistem menjadi lebih tepat dalam membedakan kejadian konvektif.

* Bias

Bias naik dari 0.356 ke 0.981, yang mengindikasikan perbaikan besar dari sistem yang sebelumnya *underforecasting* menjadi mendekati seimbang (bias ≈ 1) antara kejadian aktual dan kejadian yang diprediksi.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR turun dari 0.351 ke 0.304, menunjukkan bahwa meskipun prediksi meningkat, jumlah alarm palsu justru sedikit menurun, artinya sistem menjadi lebih efisien

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat dari 0.205 ke 0.526, mencerminkan peningkatan kemampuan sistem dalam mendeteksi kejadian sebenarnya, sebuah indikator penting untuk evaluasi sistem peringatan dini.

* *ProbabiTTty of Detection* (POD)

POD meningkat dari 0.231 menjadi 0.683, menandakan peningkatan besar dalam sensitivitas sistem terhadap kejadian nyata. Sistem sebelumnya sering gagal mendeteksi kejadian konvektif, tetapi setelah penyesuaian ambang, menjadi lebih responsif.

*k. Verifikasi Showalter Index (SI) pada jam 00UTC*

Verifikasi Indeks SI pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Zakir (2010) yang terdapat pada tabel 4.31.

**Tabel 4.31 Verifikasi indeks SI dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 00UTC**



**Gambar 4.11** Grafik verifikasi indeks SI dengan awan *Cumulonimbus* jam00 UTC

Sesuai data di Tabel 4.31 dan Gambar 4.11 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Nilai akurasi meningkat dari 0.506 menjadi 0.652, menunjukkan peningkatan signifikan dalam kemampuan sistem untuk membedakan kejadian dan bukan kejadian konvektif secara benar. Ini mengindikasikan bahwa ambang baru lebih optimal dalam klasifikasi cuaca ekstrem.

* Bias

Bias naik dari 0.556 menjadi 0.873, artinya sistem yang awalnya *underforecasting* (memprediksi terlalu sedikit kejadian) kini lebih mendekati keseimbangan antara jumlah kejadian aktual dan yang diprediksi. Nilai bias yang lebih tinggi namun tidak berlebihan menunjukkan peningkatan sensitivitas tanpa berlebihan dalam memprediksi.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR turun sedikit dari 0.229 menjadi 0.209, yang artinya meskipun jumlah prediksi kejadian meningkat, rasio alarm palsu justru membaik, membuat sistem tetap efisien.

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat dari 0.380 ke 0.584, menandakan bahwa sistem lebih andal dalam mendeteksi kejadian nyata, sebuah indikator penting untuk sistem peringatan dini.

* *ProbabiSIty of Detection* (POD)

POD melonjak dari 0.429 menjadi 0.690, menunjukkan bahwa sistem dengan ambang baru memiliki kemampuan yang jauh lebih baik dalam mendeteksi kejadian konvektif yang benar-benar terjadi.

*l. Verifikasi Showalter Index (SI) pada jam 12UTC*

Verifikasi Indeks SI pada kejadian munculnya awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC menggunakan data *Meteorological Aerodrome Report* (Metar) pada periode Desember, Januari, dan Februari (DJF) dan Maret, April, dan Mei (MAM) pada tahun 2023. Nilai verifikasi ambang batas baru yang didapat dengan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990) yang terdapat pada tabel 4.32.

**Tabel 4.32 Verifikasi indeks SI dengan awan *Cumulonimbus* pada jam 12UTC**



**Gambar 4.12** Grafik verifikasi indeks SI dengan awan *Cumulonimbus* jam12 UTC

Berdasarkan Tabel 4.32 dan Gambar 4.12 terdapat adanya perbedaan nilai verifikasi antara nilai ambang batas baru dan nilai ambang batas awal berdasarkan klasifikasi Force (1990). Berikut penjelasan dari kedua nilai ambang batas tersebut berdasarkan klasifikasinya:

* Akurasi

Akurasi meningkat dari 0.653 ke 0.716, memperlihatkan peningkatan performa klasifikasi, meskipun tidak sebesar pada jam 00 UTC. Ini mengindikasikan bahwa ambang baru juga bekerja cukup baik pada jam 12.

* Bias

Bias naik dari 0.856 ke 1.250, menunjukkan pergeseran dari prediksi yang seimbang menuju overforecasting. Meskipun sistem menjadi lebih sensitif, peningkatan ini perlu dicermati agar tidak memunculkan terlalu banyak prediksi palsu.

* *False Alarm Ratio* (FAR)

FAR naik dari 0.258 ke 0.292, yang berarti terdapat sedikit peningkatan dalam alarm palsu, kemungkinan akibat dari bias yang meningkat. Namun nilainya masih dalam batas yang wajar

* *Threat Score* (TSc)

TSc meningkat dari 0.520 menjadi 0.648, memperlihatkan bahwa sistem dengan ambang baru lebih efektif dalam mendeteksi kejadian aktual, meskipun sedikit lebih banyak alarm palsu.

* *ProbabiSIty of Detection* (POD)

POD naik signifikan dari 0.635 ke 0.885, mengindikasikan bahwa sistem jauh lebih mampu mendeteksi kejadian nyata, menjadikannya lebih dapat diandalkan untuk keperluan peringatan dini.

**BAB V**

**PENUTUP**

**1. Kesimpulan**

1. Nilai ambang batas baru yang ditentukan menggunakan metode Sturges terbukti efektif dalam mengelompokkan data indeks atmosfer LI, KI, SWEAT, CAPE, *Total Totals Index*, dan *Showalter Index*, sehingga menghasilkan klasifikasi yang lebih representatif terhadap kondisi atmosfer aktual. Penggunaan metode ini memberikan dasar statistik yang kuat dalam menetapkan rentang nilai setiap indeks untuk mendeteksi potensi konvektif ekstrem.
2. Verifikasi terhadap nilai ambang batas baru menunjukkan peningkatan akurasi dalam mendeteksi keberadaan awan Cumulonimbus, terutama melalui peningkatan nilai *Probability of Detection* (POD) dan *Threat Score* (TSc). Indeks LI dan SWEAT mengalami peningkatan performa paling signifikan, sementara KI dan CAPE mempertahankan performa tinggi. Hal ini membuktikan bahwa ambang batas baru dapat meningkatkan keandalan sistem prakiraan cuaca ekstrem, khususnya untuk mitigasi risiko meteorologis.

**2. Saran**

Optimalisasi ambang baru yang terbukti meningkatkan performa deteksi cuaca ekstrem sebaiknya diterapkan secara operasional. Evaluasi berkala dengan data jangka panjang, penggunaan kombinasi indeks (seperti LI dan SWEAT), serta peningkatan pemahaman *forecaster* terhadap makna indeks sangat dianjurkan. Pengembangan sistem berbasis *machine learning* dan validasi di wilayah lain akan memperkuat generalisasi hasil. Kolaborasi antara lembaga meteorologi, akademisi, dan pemerintah daerah penting untuk mewujudkan sistem peringatan dini yang adaptif, akurat, dan berbasis ilmu pengetahuan.

# Ahrens, C., 2012. *Meteorology today: An introduction to weather, climate and the environment.* I ed. Canada: Nelson Education.

Bluestein, H. B., 1993. *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes.* II ed. New York: Oxford University.

BMKG, 2010. *Keputusan No.009 Tentang Prosedur Standart Operasional Pelaksanaan Peringatan Dini, Pelaporan, dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrem.* I ed. Jakarta: BMKG.

Budiarti, M., 2012. Studi Indeks Stabilitas Udara Terhadap Prediksi Kejadian Badai Guntur (Thunderstorm) di Wilayah Stasiun Meteorologi Cengkareng Banten. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika,* Vol. 13(2), pp. 111-117.

DeRubertis, D., 2006. Recent trends in four common stability indices derived from US radiosonde observations. *Journal of climate,* 19(3), pp. 309-323.

Ekawati, D., 2018. *Analisis Indeks Stabilitas Saat Kejadian Badai Guntur Pada Puncak Hujan Di Ambon Tahun 2015-2017.* I ed. Tangerang Selatan: STMKG.

Fibriantika, E., 2020. Analisis Spasial Indek Stabilitas Udara Di Indonesia. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca,* 21(1), pp. 1-12.

Force, U. A., 1990. *The use of the skew t, log p diagram in analysis and forecasting.* I ed. New York: Air Weather Service.

Galway, J. G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Journal Bulletin of the American Meteorological Society,* 37(10), pp. 528-529.

George, J., 1960. Weather Forecasting for Aeronautics. *Academic Press,* Volume 41.

Handayani, D., 2016. Analisis Angin Zonal Dan Outgoing Longwave Radiation (Olr) Untuk Inisialisasi Kemunculan Fenomena Madden Julian Oscillation (Mjo) Di Kota Padang. *Pillar of Physics,* 8(2), pp. 9-16.

Hermawan, E., 2010. Pengelompokkan Pola Curah Hujan yang terjadi di beberapa kawasan P. Sumatera berbasis hasil analisis teknik spektral. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika,* 11(2), pp. 75-85.

HK, Bayong Tjasyono., 2006. *Meteorologi Indonesia Volume I.* I ed. Jakarta: BMKG.

Isnoor, K., 2017. *Stabilitas Atmosfer Saat Kejadian Pertumbuhan Awan Cumulonimbus Di Ambon (Studi Kasus Tanggal 01 Januari 2017).* I ed. Jatinangor: Universitas Padjajaran.

Lisnawati, L., 2018. Profil Klimatologis. *Lapse Rate Vertikal di Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon,* 18(2), pp. 95-106.

Marinaki, A., 2006. Evaluation of atmospheric instability indices in Greece. *Journal Advances in Geosciences,* 7(I), pp. 131-135.

Mayangwulan, D., 2011. Potensi Kejadian Badai Guntur Berdasarkan Parameter Kelembapan, Labilitas Udara, dan Mekanisme Pengangkatan (Studi Kasus: di Bandar Udara Frans Kaisiepo Biak). *Jurnal Sains Dirgantara,* Volume 8, pp. pp 139-156.

Nuryadi, N., 2017. *Dasar-Dasar Statistika Penelitian.* I ed. Yogyakarta: Sibuku Media.

Permatasari, M. P., 2019. *Studi Akurasi Indeks Stabilitas Saat Kejadian Badai Guntur di Pontianak Periode Januari 2015 – Desember 2018.* I ed. Tangerang Selatan: STMKG.

Sosaidi, D., 2013. *Cuaca Dan Iklim Ekstrim Di Indonesia.* I ed. Jakarta: BMKG.

Stull, R., 2017. *Practical Meteorology.* 1.02 ed. Vancouver, Canada: The University of British Colombia.

Sturges, H. A. J., 1926. The choice of a class interval. *Journal of the american statistical association,* Volume 21 no 153, pp. 65-66.

Syaifullah, M. D., 2011. Potensi Atmosfer dalam Pembentukan Awan Konvektif pada Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca di DAS Kotopanjang dan DAS Singkarak 2010. *Jurnal Sains Teknologi Modifikasi Cuaca,* 12(1), pp. 9-16.

Tjasyono, B., 2007. *Mikrofisika Awan dan Hujan.* I ed. Jakarta: BMKG.

Tyagi, B., 2011. Study of thermodynamic indices in forecasting pre-monsoon thunderstorms over Kolkata during STORM pilot phase 2006–2008. *Journal Natural hazards,* 56(3), pp. 681-698.

Vujović, D., 2015. Evaluation of the stability indices for the thunderstorm forecasting in the region of Belgrade, Serbia. *Journal Advances in Geosciences,* Volume 161, pp. 143-152.

Wardana, M. F. D., 2018. *Penentuan Nilai Ambang Indeks Stabilitas Udara Untuk Kejadian Awan Cumulonimbus dan Thunderstorm Di Stasiun Meteorologi Ranai.* Tangerang Selatan: STMKG.

Widodo, M. I., 2018. *Penentuan Nilai Ambang Batas Indeks Stabilitas Atmosfer Pada Saat Kejadian Badai Guntur di Wilayah Sorong.* Tangerang Selatan: STMKG.

Wilks, D. S., 2019. Statistical methods in the atmospheric sciences. *Academic Press,* Volume 100.

Wirjohamidjojo, S., 2013. *Meteorologi Sinoptik Analisis Dan Penaksiran Hasil Analisis Cuaca Sinoptik.* Jakarta: Puslitbang BMKG.

Yau, M. K., 1996. *A short course in cloud physics.* 113 ed. Burlington: Elsevier.

Yoneyama, K., 2002. Radiosonde observation from the ship in the tropical region. *JAMSTEC,* Volume 45, pp. 31-39.

Zahroh, N., 2017. Indeks Labilitas Udara Untuk Memprediksi Kejadian Badai Guntur pada Puncak Musim Hujan Tahun 2016. *Journal Sains Teknologi Modifikasi Cuaca,* 18(1), pp. 9-15.

Zakir, A., 2010. *Perspektif Operasional Cuaca Tropis..* Jakarta: BMKG.

J. Supranto., 2008. Statistik: Teori & Aplikasi – Jilid I. Universitas Airlangga. Surabaya

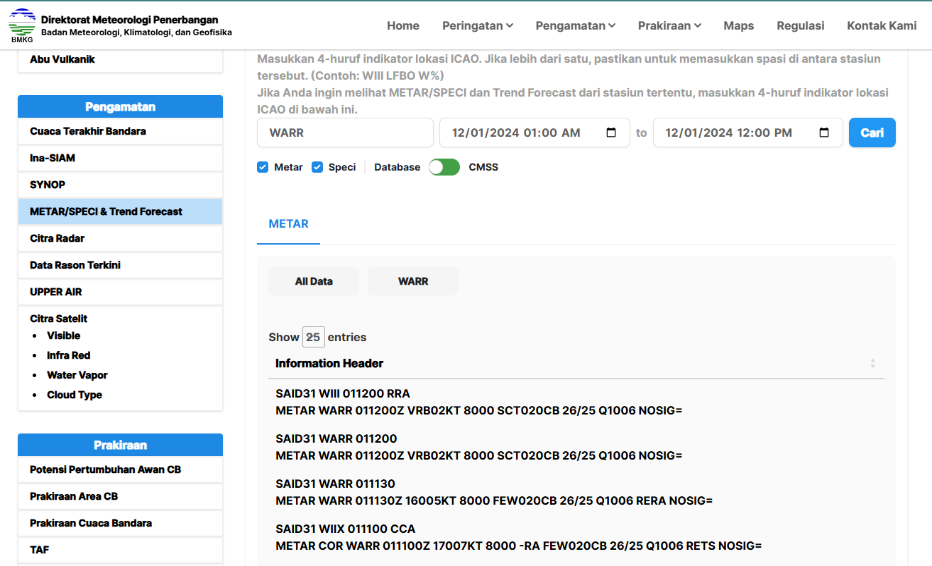
**LAMPIRAN-LAMPIRAN**

**Lampiran 1**. Data metar dari Stasiun Meteorologi Juanda

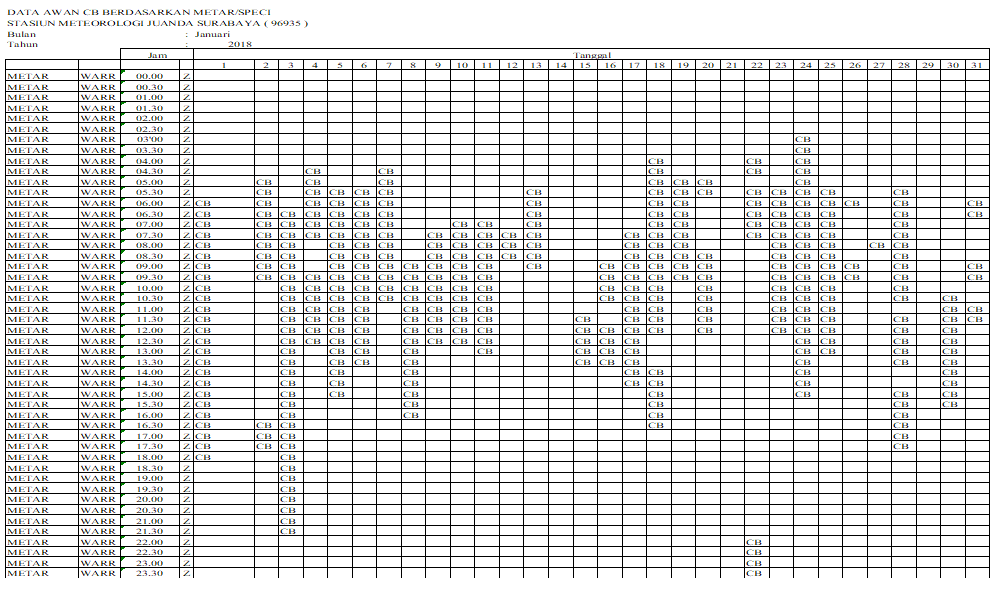
****

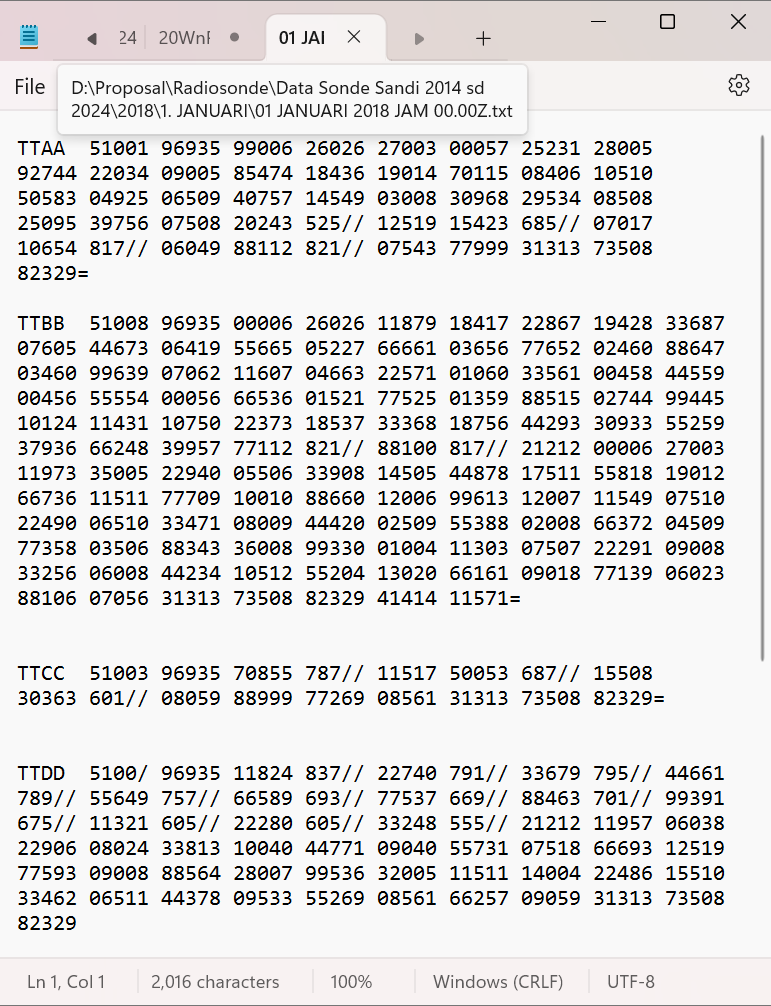
**Lampiran 2**. Data metar dari situs Aviation.bmkg

([*https://web-aviation.bmkg.go.id/web/metar\_speci.php*](https://web-aviation.bmkg.go.id/web/metar_speci.php))



**Lampiran 3**. Tabulasi data metar dengan menggunakan Microsoft excel

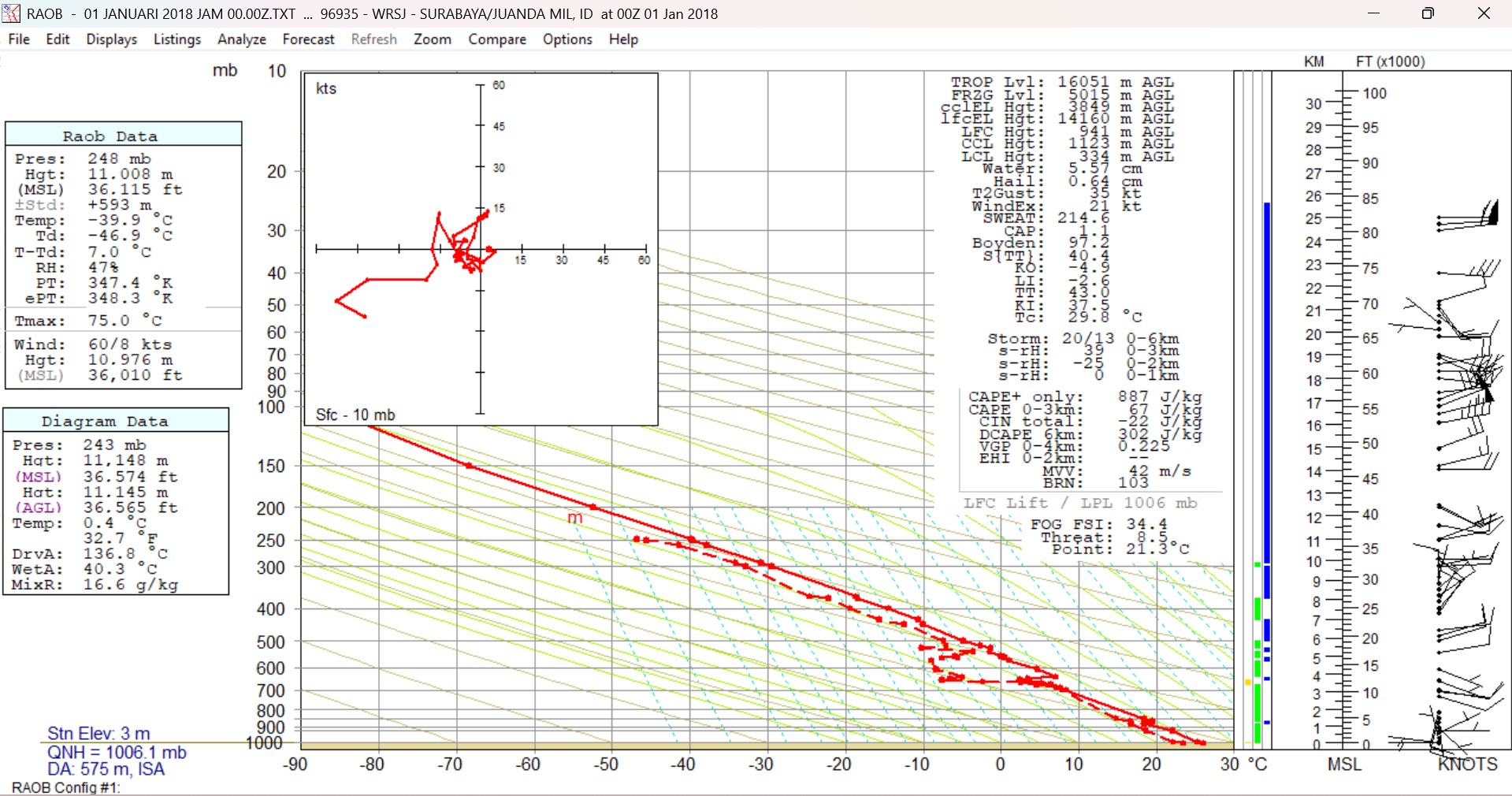


**Lampiran 4**. Contoh data sounding dalam bentuk teks (sandi) di *Notepad*

86

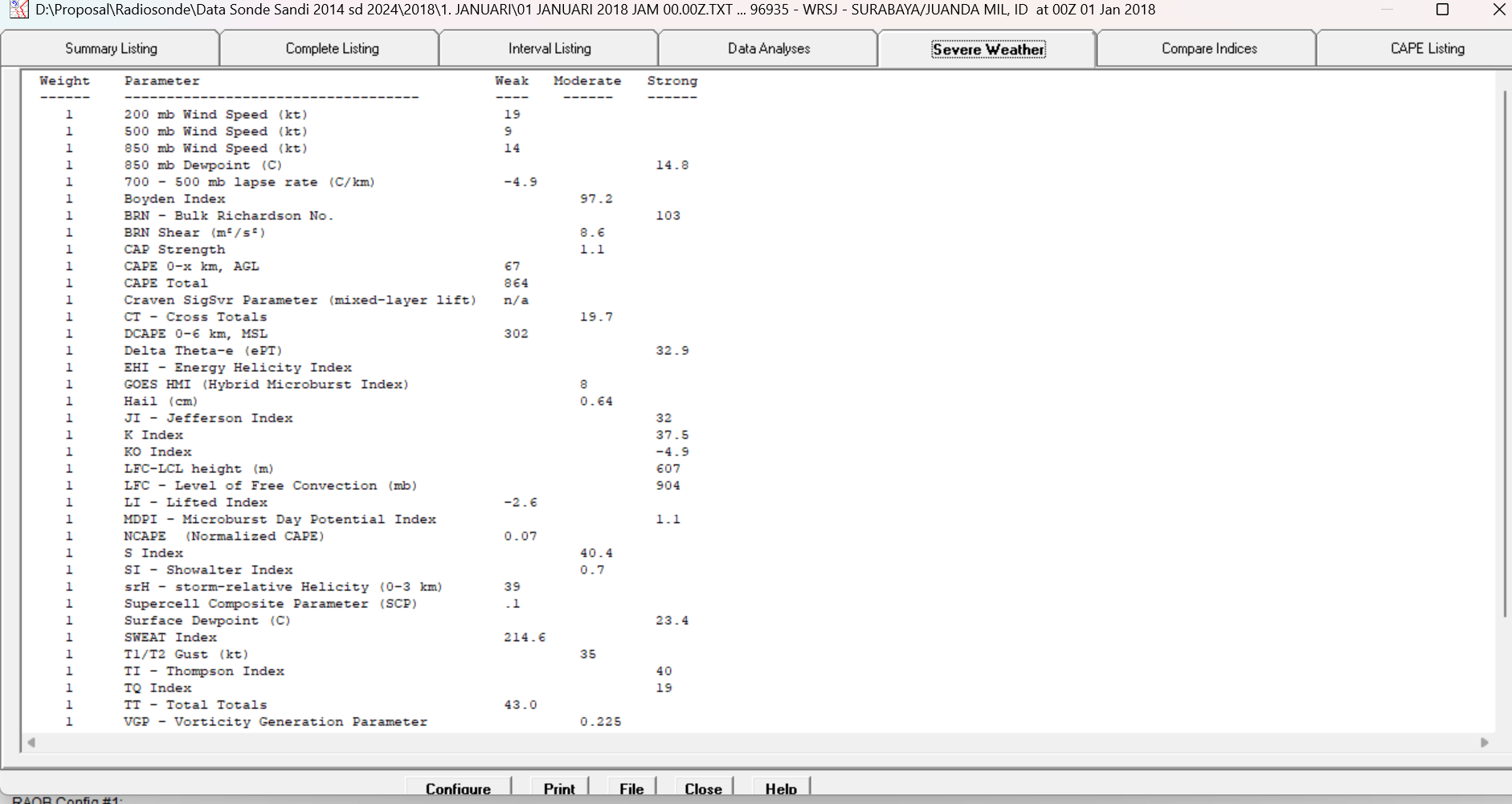
**Lampiran 5**. Contoh data Radiosonde yang diolah dalam aplikasi RAOB 5.7

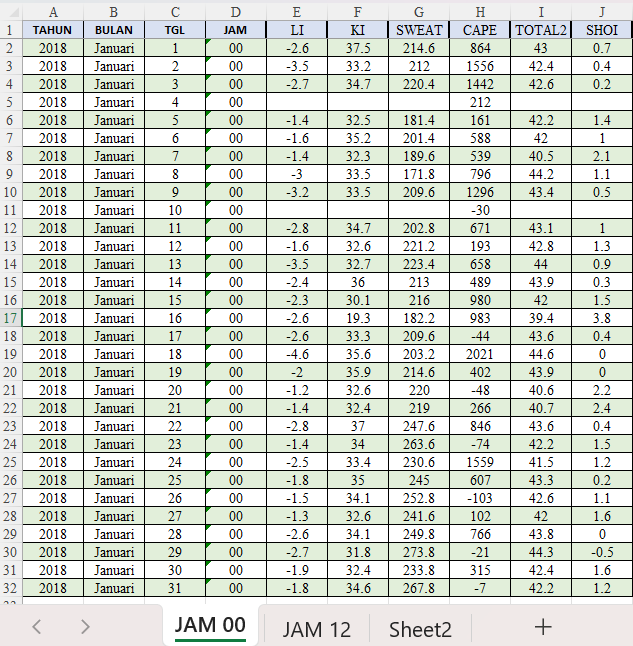
87



**Lampiran 6**. Indeks stabilitas atmosfer hasil pengolahan di aplikasi RAOB 5.7

88



**Lampiran 7**. Pengelompokan indeks berdasarkan waktu pengamatan.

89