

Klasifikasi dan Estimasi Ketinggian *Planetary Boundary Layer* (PBL) Menggunakan Data Radiosonde

Daniar Ihza Carundyatama^{1)*}, Anisa Nabilah¹⁾, Yosafat Donni Haryanto¹⁾ 

¹⁾Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Kota Tangerang, 15221, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: daniarihza7@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima: 23 Januari 2026

Direvisi : 08 April 2026

Disetujui: 21 April 2026

Kata Kunci:

Planetary boundary layer;
Radiosonde;
Konvektif;
Stabil.

Keywords:

Planetary boundary layer;
Radiosonde;
Convective;
Stable.

ABSTRAK

Planetary Boundary Layer (PBL) merupakan lapisan atmosfer terdekat dengan permukaan bumi yang berperan penting dalam dinamika cuaca. Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan tipe dan mengestimasi ketinggian PBL di tiga wilayah Indonesia yang merepresentasikan perbedaan lintang menggunakan data radiosonde selama periode Januari–Desember 2024. Klasifikasi dilakukan menggunakan metode *Potential Temperature Difference* (PTD), sedangkan estimasi ketinggian PBL menggunakan metode gradien suhu potensial, kelembapan relatif, dan *parcel method*. Hasil menunjukkan bahwa pada pukul 00.00 UTC, PBL didominasi oleh *stable boundary layer* (SBL), sedangkan pada pukul 12.00 UTC terjadi peningkatan variasi dengan kemunculan *neutral boundary layer* (NBL) dan *convective boundary layer* (CBL). Estimasi ketinggian PBL berkisar antara <500 m hingga >2000 m, dengan nilai terendah umumnya terjadi pada periode pagi hari dan tertinggi pada periode JJA. Penelitian ini menunjukkan bahwa variabilitas PBL di Indonesia dikontrol oleh siklus diurnal, perbedaan lintang, dan kondisi termodinamik atmosfer, serta memberikan kontribusi dalam pemahaman karakteristik PBL di wilayah maritim tropis.

ABSTRACT

The Planetary Boundary Layer (PBL) is the atmospheric layer closest to the Earth's surface that plays a crucial role in weather dynamics. This study aims to classify the types and estimate the heights of the PBL in three regions of Indonesia representing different latitudes using radiosonde data during the period of January–December 2024. Classification was performed using the Potential Temperature Difference (PTD) method, while PBL height estimation utilized the potential temperature gradient, relative humidity, and parcel methods. The results show that at 00:00 UTC, the PBL is dominated by a stable boundary layer (SBL), whereas at 12:00 UTC, there is an increase in variability with the emergence of a neutral boundary layer (NBL) and a convective boundary layer (CBL). Estimates of PBL height ranged from <500 m to >2000 m, with the lowest values generally occurring in the morning and the highest during the JJA period. This study demonstrates that PBL variability in Indonesia is controlled by diurnal cycles, latitudinal differences, and atmospheric thermodynamic conditions, and contributes to the understanding of PBL characteristics in tropical maritime regions.

PENDAHULUAN

Planetary Boundary Layer (PBL) atau lapisan batas planet merupakan lapisan atmosfer yang paling dekat dengan permukaan bumi, memainkan peran penting dalam pertukaran energi, massa, dan



momentum antara permukaan bumi dan atmosfer (Garrratt, 1994). PBL memengaruhi berbagai fenomena meteorologi seperti pembentukan awan, pola angin, dan distribusi suhu (Li dkk., 2021; Liu & Liang, 2010). Stull menjelaskan bahwa PBL merespons gaya permukaan dalam waktu kurang dari satu jam dan mengikuti siklus diurnal pemanasan dan pendinginan permukaan, menciptakan pola yang kompleks dalam interaksi atmosfer-bumi (Stull, 1988). Liu juga mengamati bahwa PBL menunjukkan siklus diurnal yang kuat di atas daratan dan lautan, dengan puncak yang berbeda pada pukul 15.00 dan 12.00 waktu setempat (Liu & Liang, 2010). Di wilayah tropis seperti Indonesia, karakteristik PBL sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari yang tinggi dan kelembapan yang signifikan (Hashiguchi dkk., 1995). Penelitian menunjukkan bahwa intensitas penyinaran dan kelembapan yang konsisten menyebabkan variabilitas PBL yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lintang menengah atau tinggi (Gu dkk., 2020). Hal ini terkait dengan pemahaman cuaca dan iklim lokal, serta kemampuan untuk memprediksi kejadian ekstrem seperti banjir, kekeringan, dan perubahan iklim yang cepat. Pemahaman kondisi lokal penting untuk menghasilkan interpretasi cuaca yang akurat. Dengan demikian, pengamatan PBL di Indonesia sangat penting untuk memahami fenomena cuaca yang berkaitan dengan kondisi lokal. PBL umumnya diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama yaitu *Convective Boundary Layer* (CBL), *Stable Boundary Layer* (SBL), dan *Neutral Boundary Layer* (NBL) (Liu & Liang, 2010). CBL terjadi pada siang hari ketika pemanasan permukaan menghasilkan turbulensi termal yang signifikan. Sebaliknya, SBL terbentuk pada malam hari sebagai akibat dari pendinginan permukaan dan pembentukan lapisan inversi suhu. NBL umumnya terjadi dalam kondisi transisi saat atmosfer cenderung netral. Gu dkk., menyatakan bahwa memahami karakteristik masing-masing tipe PBL sangat penting untuk memodelkan proses atmosfer secara akurat (Gu dkk., 2020).

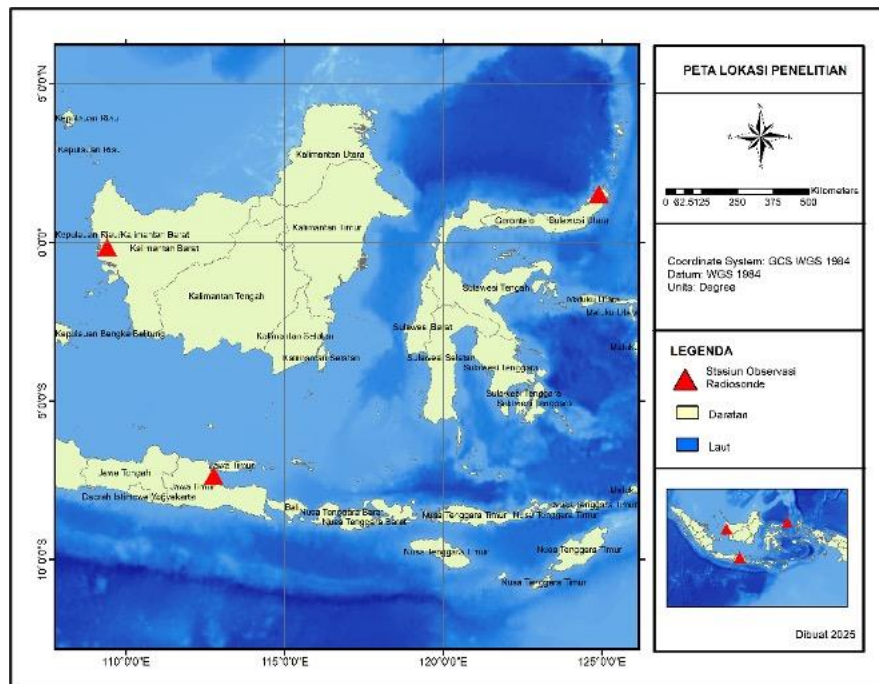
Penentuan ketinggian PBL merupakan tantangan tersendiri karena kompleksitas dan variabilitas atmosfer (Stull, 1988). Berbagai instrumen, seperti radiosonde, lidar, dan *wind profiler*, dapat digunakan untuk menentukan struktur PBL (Li dkk., 2021; Zhang dkk., 2025). Beberapa metode estimasi ketinggian PBL dari data radiosonde juga telah dikembangkan, seperti *gradient method*, *parcel method*, dan *Richardson number* (Li dkk., 2021; Seidel dkk., 2010). Setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan, sehingga pemilihan metode yang tepat bergantung pada kondisi atmosfer dan ketersediaan data (Seidel dkk., 2010). *Parcel method* berfokus pada pergerakan parsel udara, sedangkan *Richardson number* menilai keseimbangan antara gaya apung dan gesekan angin (Stull, 1988). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui klasifikasi dan estimasi ketinggian (PBL) di tiga wilayah pengamatan yaitu lintang selatan Indonesia, ekuator, dan lintang utara Indonesia untuk melihat variabilitas PBL dan ketinggian rata-rata bulanan pada wilayah penelitian (Hamdi dkk., 2024). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna untuk meningkatkan pemahaman tentang dinamika PBL di wilayah Indonesia, serta mengembangkan model atmosfer lokal yang lebih efektif dan akurat dalam prakiraan cuaca di lintang selatan Indonesia, ekuator, dan lintang utara.

Pada penelitian sebelumnya telah membahas karakteristik PBL serta metode estimasi ketinggiannya menggunakan data radiosonde, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada wilayah lintang menengah atau menggunakan pendekatan tunggal dalam estimasi ketinggian PBL. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan klasifikasi tipe PBL (CBL, SBL, dan NBL) dengan estimasi ketinggian PBL menggunakan beberapa metode secara masih terbatas, khususnya di wilayah tropis maritim Indonesia. Indonesia memiliki karakteristik unik berupa interaksi kuat antara laut dengan atmosfer, kelembapan tinggi, serta pengaruh posisi lintang dan bujur yang berpotensi menghasilkan variabilitas PBL yang berbeda dibandingkan wilayah lain. Hingga saat ini, studi komprehensif yang membandingkan karakteristik dan ketinggian PBL pada berbagai zona lintang di Indonesia (lintang selatan, ekuator, dan lintang utara) dengan mempertimbangkan variasi temporal (diurnal dan musiman) masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut, sekaligus memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika PBL di wilayah Indonesia sebagai dasar peningkatan akurasi model atmosfer dan prakiraan cuaca di kawasan tropis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi dan estimasi ketinggian PBL di tiga wilayah pengamatan yaitu lintang selatan Indonesia, ekuator, dan lintang utara Indonesia untuk melihat variabilitas PBL dan ketinggian rata-rata bulanan pada ketiga wilayah tersebut. Wilayah Lintang Selatan menggunakan data pengamatan radiosonde Stasiun Meteorologi Kelas I Juanda Surabaya, wilayah ekuator menggunakan data pengamatan radiosonde Stasiun Meteorologi Kelas I Supadio

Pontianak, dan wilayah Lintang Utara menggunakan data pengamatan radiosonde Stasiun Meteorologi Kelas I Manado. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian klasifikasi dan estimasi PBL

Data radiosonde yang digunakan merupakan hasil pengamatan reguler pada jam 00.00 UTC dan 12.00 UTC selama periode 1 Januari 2024 hingga 31 Desember 2024. Seluruh data diperoleh melalui arsip daring <https://weather.uwyo.edu/upperair/>. Variabel yang dikumpulkan meliputi tekanan (P), ketinggian geopotensial (Z), suhu udara (T), titik embun (Td), kelembapan relatif (RH), arah angin, kecepatan angin, suhu potensial (θ), dan suhu potensial virtual (θ_v). Mengingat sifat pengamatan radiosonde yang bersifat vertikal dan diskret, seluruh data harian dikelompokkan secara bulanan untuk memudahkan analisis keragaman kondisi PBL secara klimatologis maupun musiman di wilayah studi. Data yang didapatkan diolah secara tabular menggunakan Microsoft Excel dan pemrograman Python untuk perhitungan estimasi ketinggian PBL.

Teknik Analisis Data

Klasifikasi PBL dilakukan dengan pendekatan perubahan suhu potensial vertikal pada lima level pembacaan awal radiosonde. Perhitungan gradien dilakukan menggunakan selisih suhu potensial Persamaan 1.

$$PTD(a - b) = \theta a - \theta b \quad (1)$$

dengan:

- θa : suhu potensial pada level ke-a (level atas)
 θb : suhu potensial pada level ke-b (level bawah)

Dua parameter kunci digunakan dalam penentuan kategori: PTD (5–2) dan PTDI (3–1). Aturan klasifikasi berdasarkan [Li dkk., \(2021\)](#) sebagai berikut:

1. PBL dikategorikan sebagai *Stable Boundary Layer* (SBL) apabila $PTD(5-2) > 0.1$ K dan $PTDI(3-1) > 0$ K;
2. *Convective Boundary Layer* (CBL) apabila $PTD(5-2) < -0.1$ K; dan
3. Kondisi lain yang tidak memenuhi kedua syarat tersebut diidentifikasi sebagai *Neutral Boundary Layer* (NBL). Pendekatan ini memungkinkan pemisahan tipe struktur PBL secara objektif berdasarkan profil termodinamik awal atmosfer.

Setelah klasifikasi, estimasi ketinggian PBL dihitung menggunakan tiga pendekatan yang saling melengkapi yaitu gradien tekanan (GM θ), gradien kelembaban (GM rh), dan *Parcel Method* (PM). Metode gradien digunakan untuk menelusuri perubahan gradien lokal pada profil vertikal atmosfer sebagai dasar penentuan ketinggian *Planetary Boundary Layer Height* (PBLH) ([Aryee dkk., 2020](#); [Apriadi, 2023](#)). Pendekatan ini bekerja dengan mengidentifikasi titik minimum lokal pada profil gradien suhu potensial (GM θ) maupun gradien kelembaban relatif (GM RH) yang melampaui nilai ambang tertentu. Titik minimum tersebut diasosiasikan sebagai batas atas PBL berdasarkan karakteristik transisi yang tajam antara lapisan campuran dan lapisan atmosfer bebas ([Seidel dkk., 2010](#); [Stull, 1988](#); [Garratt, 1994](#)). Dalam penelitian ini, ambang batas yang digunakan masing-masing adalah $0,003 \text{ K m}^{-1}$ untuk GM θ dan 0 K m^{-1} untuk GM RH. Rumusan terkait estimasi PBL menggunakan metode gradien suhu potensial terdapat pada Persamaan 2 dan estimasi PBL menggunakan metode gradien kelembaban terdapat pada Persamaan 3.

$$\frac{d\theta}{dzn} = \frac{\theta_n - \theta_1}{zn - z_1} \quad (2)$$

dengan:

$\frac{d\theta}{dzn}$: gradien vertikal suhu potensial
 θ_n : suhu potensial pada level ke- n (K)
 zn : ketinggian geopotensial pada level ke- n (m)

$$\frac{dRHn}{dzn} = \frac{RHn - RH_1}{zn - z_1} \quad (3)$$

dengan:

$\frac{dRHn}{dzn}$: gradien vertikal kelembaban relatif
 RHn : kelembaban relatif pada level ke- n (%)
 zn : ketinggian geopotensial pada level ke- n (m)

Metode gradien kelembaban relatif memanfaatkan sifat bahwa di dalam PBL kegiatan turbulen meningkatkan pencampuran uap air, sehingga kelembaban relatif cenderung tinggi dan relatif homogen. Batas PBL diperkirakan ketika nilai kelembaban relatif secara vertikal menunjukkan penurunan tajam atau gradien negatif signifikan yang menunjukkan berkurangnya pencampuran turbulen ([Li dkk., 2023](#)). Estimasi PBL dengan pendekatan ini menggunakan turunan dengan Persamaan 4 untuk mendeteksi titik transisi cepat menuju kondisi atmosfer yang lebih kering di atas PBL.

$$\theta v = T(1 + 0.61q) \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.286} \quad (4)$$

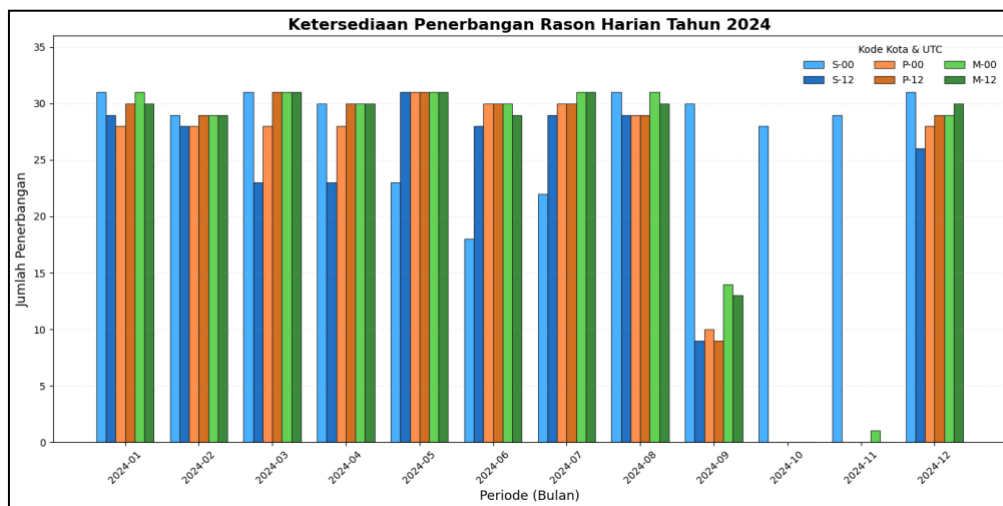
dengan:

θv : suhu potensial virtual (K)
 T : suhu udara absolut (K)
 q : kelembapan spesifik (kg kg^{-1})
 p : tekanan udara (hPa)

Dalam metode *parcel method* (PM), PBLH ditentukan sebagai ketinggian ketika parcel udara yang diangkat secara adiabatik mencapai keadaan netral terhadap lingkungannya. Definisi ini berlaku efektif pada kondisi atmosfer konvektif (CBL) maupun netral (NBL), di mana proses pencampuran vertikal umumnya berlangsung kuat ([Stull, 1988](#)). Namun, estimasi PBLH pada kondisi stabil (SBL) cenderung lebih masif terjadi karena turbulensi dan struktur termal yang lebih kompleks ([Liu & Liang, 2010](#)). Pada kondisi stabil, turbulensi dapat dipicu oleh dua mekanisme, yaitu gaya apung dan gaya geser. Oleh karena itu, apabila kedua mekanisme ini menghasilkan estimasi kedalaman lapisan batas, maka PBLH didefinisikan sebagai nilai minimum dari kedua estimasi tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari proses klasifikasi dan estimasi PBL sangat bergantung terhadap kondisi ketersediaan data. Pada tahun 2024 tidak semua stasiun memiliki ketersediaan data yang lengkap selama 365 hari. Rekapitulasi ketersediaan data yang digunakan dalam penelitian ini termuat dalam Gambar 2.

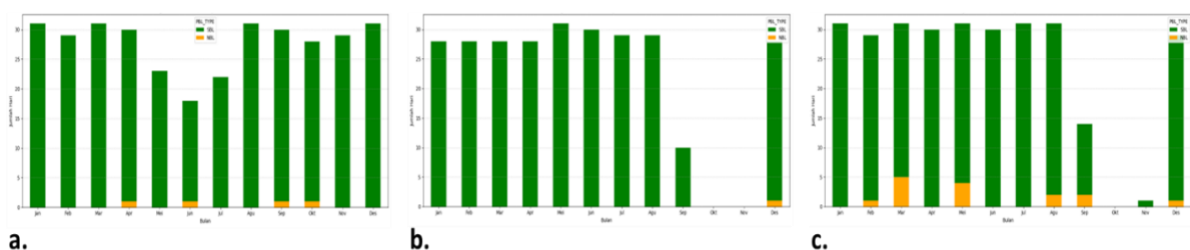


Gambar 2. Ketersediaan data radiosonde tahun 2024 dengan S-00 dan S-12 adalah data radiosonde stasiun Juanda pukul 00 dan 12; P-00 dan P-12 adalah data radiosonde Stasiun Meteorologi Pontianak; M-00 dan M-12 adalah data radiosonde Stasiun Meteorologi Manado pukul 00 dan 12.

Berdasarkan ketersediaan data Gambar 2. menunjukkan bahwa secara umum terdapat dua bulan yang terdapat kekosongan data cukup signifikan yaitu pada bulan 10-2024 dan 11-2024. Hanya Stasiun Meteorologi Surabaya yang memiliki data pada dua bulan tersebut dengan jam pengamatan pukul 00.00 UTC. Secara keseluruhan rata-rata setiap stasiun memiliki data pengamatan lebih dari 50% setiap bulannya kecuali di bulan 10 dan 11. Data yang ada tersebut menggambarkan sebaran secara temporal waktu yang akan dianalisis dalam rata-rata bulanan klasifikasi dan estimasi PBL pada penelitian ini.

Klasifikasi PBL pukul 00.00 UTC

Klasifikasi PBL dengan tiga jenis menggunakan metode *potential temperature difference* (PTD). Perhitungan PTD dilakukan pada tiga stasiun untuk pukul 00.00 UTC. Hasil ditunjukkan pada Gambar 3. dengan distribusi dari kiri ke kanan bulan Januari hingga bulan Desember.



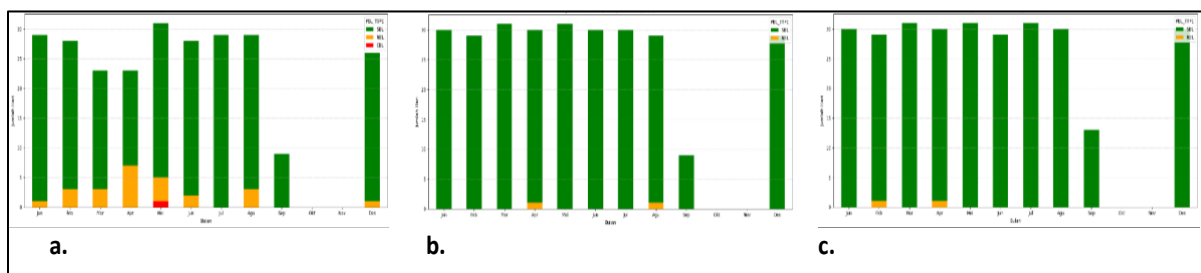
Gambar 3. Klasifikasi PBL pukul 00.00 UTC a) Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya; b) Stasiun Meteorologi Pontianak; c) Stasiun Meteorologi Manado.

Pada Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya bulan Januari secara keseluruhan menunjukkan kondisi PBL dalam kondisi SBL dengan jumlah lebih dari 28 hari. Bulan berikutnya April-Juni menunjukkan terdapat kondisi NBL sebanyak satu kali masing-masing pada bulan April dan Juni. Bulan Juli- Oktober kondisi dominan SBL, terdapat satu kali kondisi NBL pada bulan September dan Oktober. Bulan November-Desember secara keseluruhan kondisi PBL dalam keadaan SBL. Pada Stasiun Meteorologi Pontianak Gambar 3b. Menunjukkan secara keseluruhan dari bulan Januari-September PBL dalam kondisi SBL. Terdapat kekosongan data pengamatan radiosonde pada bulan Oktober dan November serta kondisi NBL sebanyak satu kali pada Bulan Desember.

Pada Stasiun Meteorologi Manado Bulan Januari-Maret cukup fluktuatif dibandingkan stasiun yang lain. Bulan Januari kondisi sepenuhnya SBL, bulan Februari kondisi dominan SBL dengan dua kali NBL. Bulan Maret menunjukkan tingkat terbanyak NBL yaitu sebanyak 5 kondisi NBL dengan tetap dominansi SBL pada sisa hari yang lain. Periode Bulan April-Juni menunjukkan dominan SBL dengan 4 kondisi NBL pada bulan Mei. Periode bulan Juli-Desember terdapat kekosongan data pada bulan Oktober dan November dengan dinamika kondisi NBL yaitu dua kali pada bulan Agustus dan September serta satu kali pada Bulan Desember. Kondisi secara umum untuk ketiga stasiun didominasi keadaan PBL SBL pada pengamatan pukul 00.00 UTC. Hal tersebut menandakan kondisi atmosfer pada pukul 00.00 UTC atau 07.00 WIB dalam keadaan stabil. Kondisi SBL yang mendominasi di wilayah Surabaya yang berada pada kawasan BBS berkaitan erat dengan lemahnya pemanasan permukaan pada pagi hari serta masih kuatnya pengaruh pendinginan radiatif malam hari yang mempertahankan struktur inversi suhu di lapisan bawah atmosfer. Selain itu, tingginya kelembapan udara dan pengaruh adveksi massa udara maritim di wilayah pesisir utara Jawa turut berperan dalam menekan perkembangan turbulensi vertikal, sehingga kondisi atmosfer pada pukul 00.00 UTC atau 07.00 WIB cenderung berada dalam keadaan stabil

Klasifikasi PBL pukul 12.00 UTC

Gambar 4. menunjukkan pola fluktuasi klasifikasi PBL pada pukul 12.00 UTC berbeda dengan kondisi 00.00 UTC. Namun, kondisi kekosongan pengisian hampir seragam terjadi pada bulan Oktober dan November sehingga memangkas gambaran klasifikasi PBL selama satu tahun.



Gambar 4. Klasifikasi PBL pukul 12.00 UTC a) Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya; b) Stasiun Meteorologi Pontianak; c) Stasiun Meteorologi Manado.

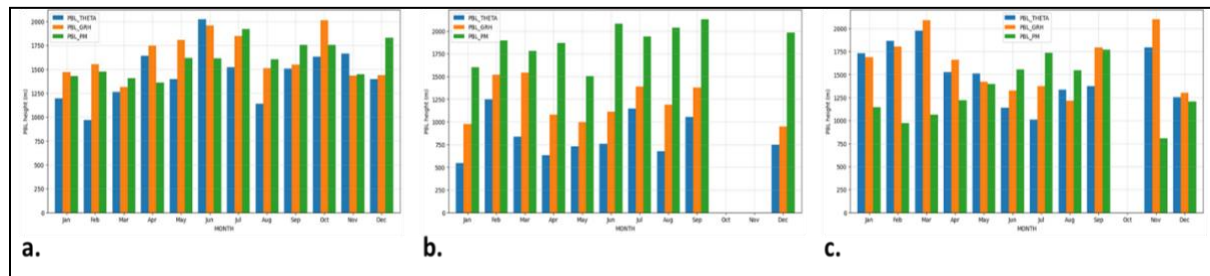
Berdasarkan Gambar 4. menunjukkan bahwa terdapat variasi kondisi CBL dan NBL pada pengamatan di Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya. Walaupun secara umum tetap didominasi kondisi SBL pada keseluruhan stasiun, variasi tipe PBL mulai terlihat pada periode siang hari akibat pengaruh pemanasan permukaan. Kondisi peningkatan signifikansi NBL dan CBL di Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya terjadi pada bulan April (7 kejadian) serta Mei (4 kejadian NBL dan 1 kejadian CBL) (Su dkk., 2020). Fenomena ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa perkembangan CBL pada siang hari dipicu oleh peningkatan radiasi matahari yang memperkuat turbulensi termal dan pencampuran vertikal di lapisan bawah atmosfer (Gu dkk., 2020). Kondisi PBL di Stasiun Meteorologi Pontianak relatif serupa, dengan variasi yang terbatas dan hanya menunjukkan perubahan distribusi NBL pada bulan transisi (April dan Agustus). Hal ini konsisten dengan karakteristik wilayah ekuatorial yang memiliki variabilitas diurnal lebih moderat akibat dominasi kelembapan tinggi dan konveksi yang berlangsung hampir sepanjang tahun (Gu dkk., 2020). Sementara itu, pengamatan di Stasiun Meteorologi Manado menunjukkan penurunan frekuensi NBL pada pukul 12.00 UTC dibandingkan pukul 00.00 UTC (Kurzeja dkk., 1991). Hal ini, menunjukkan peralihan cepat menuju kondisi konvektif atau stabil yang lebih dominan. Studi lain juga menunjukkan bahwa siklus diurnal PBL di wilayah tropis ditandai oleh dominasi SBL pada malam hingga pagi hari dan perkembangan CBL pada siang hingga sore hari, dengan ketinggian PBL maksimum terjadi pada siang hari akibat pemanasan permukaan yang intens (Metha dkk., 2016).

Estimasi ketinggian PBL pukul 00.00 UTC

Interpretasi ketinggian rata-rata PBL menggunakan tiga metode estimasi yaitu metode gradien suhu menggunakan Persamaan 1, metode gradien kelembapan menggunakan Persamaan 2, dan *parcel method* menggunakan Persamaan 3. Ketiga metode tersebut dianalisis pada dua periode waktu yaitu

pukul 00.00 UTC dan 12.00 UTC (Wang dkk., 2024). Estimasi ketinggian rata-rata PBL bulanan di Stasiun Meteorologi Juanda mengalami puncak tertinggi pada Bulan Juni dengan ketinggian mencapai 2000 m dari hasil metode gradien suhu potensial. Sedangkan, ketinggian rata-rata PBL paling rendah pada bulan Februari dengan ketinggian kurang dari 1000 m dari hasil metode gradien suhu. Secara keseluruhan nilai estimasi PBL menggunakan gradien suhu potensial menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan dua metode lainnya.

Pada Stasiun Meteorologi Pontianak estimasi rata-rata bulanan ketinggian PBL tertinggi pada Bulan September mencapai >2150 m dari hasil estimasi metode *parcel*. Sedangkan nilai estimasi PBL terendah pada bulan Januari dengan ketinggian <500 m dari estimasi metode gradien suhu. Secara keseluruhan metode *parcel* menunjukkan nilai estimasi PBL lebih tinggi dibandingkan dua metode lainnya untuk wilayah Stasiun Meteorologi Pontianak ditunjukkan Gambar 5.

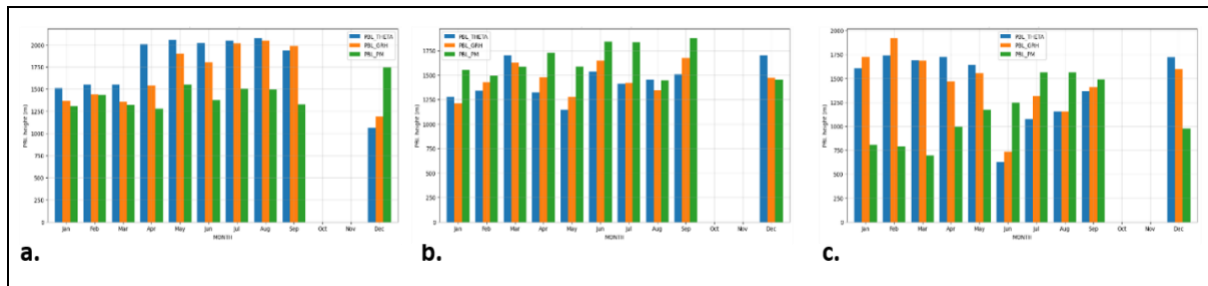


Gambar 5. Estimasi tinggi rata-rata PBL bulanan pukul 00.00 UTC pada a) Stasiun Meteorologi Juanda; b) Stasiun Meteorologi Pontianak, c) Stasiun Meteorologi Manado menggunakan metode gradient suhu potensial (bar biru), gradien kelembapan (bar kuning), *parcel method* (bar hijau).

Variabilitas musiman pada ketiga stasiun relatif berbeda seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Variabilitas musiman terbagi dalam empat periode musim yaitu Desember Januari Februari (DJF), Maret April Mei (MAM), Juni Juli Agustus (JJA), dan September Oktober November (SON). Variabilitas menggunakan metode gradien suhu di Stasiun Meteorologi Juanda menunjukkan fase tertinggi PBL pada musim JJA mencapai >2000 m dan fase terendah pada periode DJF <1000m. Pada stasiun Meteorologi Pontianak dengan metode yang sama fase tertinggi PBL ditunjukkan pada periode JJA yaitu berkisar 1250 m dan fase terendah pada periode DJF yaitu <600 m. Sedangkan, pada Stasiun Meteorologi Manado fase tertinggi ditunjukkan pada periode MAM berkisar 2000 m dan fase terendah pada periode JJA. Kondisi dengan metode gradien kelembapan dan metode *parcel* pada Stasiun Meteorologi Juanda menunjukkan fase tertinggi dan terendah yang sama yaitu berturut-turut pada periode JJA dan MAM. Pada Stasiun meteorologi Pontianak metode gradien kelembapan menunjukkan periode tertinggi pada bulan MAM dan terendah pada bulan DJF. Pada stasiun Meteorologi Manado dengan metode yang sama menunjukkan fase tertinggi dan terendah berturut-turut yaitu SON dan JJA. Kondisi ketinggian PBL pada ketiga stasiun secara umum menunjukkan kesesuaian parsial dengan temuan Allabakash dan Lim bahwa tinggi PBL cenderung maksimum pada musim dengan intensitas radiasi matahari tinggi dan aktivitas konveksi kuat, sebagaimana tercermin pada Stasiun Meteorologi Juanda yang mencapai puncak pada periode JJA (Allabakash & Lim, 2020).

Estimasi ketinggian PBL pukul 12.00 UTC

Estimasi ketinggian PBL pada Stasiun Meteorologi Juanda (Gambar 6a) menunjukkan variasi musiman yang cukup jelas pada periode siang hari (12.00 UTC). Ketiga metode, yaitu metode gradien suhu potensial, gradien kelembapan, serta *parcel method*, memperlihatkan pola peningkatan PBL yang signifikan pada bulan April hingga Agustus dengan puncak tertinggi mencapai sekitar 2000 m pada bulan Mei–Juni dengan estimasi tertinggi diberikan oleh metode gradien suhu potensial. Kondisi ini mengindikasikan penguatan proses konvektif selama periode monsun timur yang ditandai oleh udara lebih kering dan peningkatan pemanasan permukaan di wilayah selatan Indonesia. Sebaliknya, pada periode Januari–Februari, ketiga metode secara konsisten memberikan nilai PBL yang lebih rendah (1000–1200 m) yang berkaitan dengan kondisi atmosfer yang lebih stabil akibat tingginya kelembapan selama puncak monsun barat.



Gambar 6. Klasifikasi PBL pukul 12.00 UTC a) Stasiun Meteorologi Juanda Surabaya, b) Stasiun Meteorologi Pontianak; c) Stasiun Meteorologi Manado menggunakan metode gradient suhu potensial (bar biru), gradien kelembapan (bar kuning), parcel method (bar hijau).

Sementara itu, Stasiun Meteorologi Pontianak (Gambar 6b) yang terletak pada wilayah ekuatorial menunjukkan karakteristik PBL yang berbeda dengan fluktuasi yang lebih merata sepanjang tahun. Pola peningkatan terjadi pada bulan Juni hingga Oktober dengan kisaran 1500–1850 m, di mana parcel method cenderung memberikan estimasi PBL lebih tinggi dibandingkan metode lainnya, mencerminkan dominasi aktivitas konvektif yang kuat di wilayah ekuatorial akibat pemanasan maksimum di siang hari. Bulan Januari hingga Maret cenderung memiliki nilai PBL lebih rendah (sekitar 1100–1400 m), yang dapat dikaitkan dengan tingginya curah hujan dan penguatan konveksi awan tinggi (*deep convection*) yang membatasi perkembangan *boundary layer* secara penuh. Dominasi nilai PBL dari *parcel method* menunjukkan tingginya sensitivitas metode ini dalam mengestimasi lapisan pencampuran pada lingkungan yang sangat lembap. Berbeda dengan dua stasiun sebelumnya, Stasiun Meteorologi Manado (Gambar 6c) menunjukkan variasi musiman yang lebih kompleks.

PBL tertinggi tercatat pada bulan Maret–Mei dan September–Oktober dengan kisaran 1600–1900 m. Kondisi ini dapat berkaitan dengan adanya fase transisi monsun yang meningkatkan ketidakstabilan atmosfer serta dukungan topografi Sulawesi Utara yang memicu perkembangan konveksi orografis. Nilai PBL terendah terjadi pada November–Desember (± 900 –1100 m), yang kemungkinan terkait dengan meningkatnya kelembapan dari Laut Maluku dan Laut Sulawesi sehingga atmosfer menjadi semakin stabil pada siang hari. Perbedaan antar-metode juga terlihat cukup signifikan pada beberapa bulan, terutama parcel method yang sesekali memberikan nilai lebih tinggi dibanding metode gradien, menunjukkan sensitivitas metode terhadap dinamika termodinamik udara lembap di wilayah maritim. Kondisi PBL di tiga stasiun menunjukkan kesesuaian dengan hasil penelitian Xi dkk. (2022) yang menyatakan bahwa variasi ketinggian PBL sangat dipengaruhi oleh faktor termodinamik permukaan seperti suhu udara, kelembapan spesifik, serta stabilitas atmosfer bawah yang berperan dalam mengontrol intensitas pencampuran vertikal dan perkembangan lapisan batas atmosfer (Xi dkk., 2022). Namun, karakteristik PBL di wilayah Pontianak dan Manado memperlihatkan respons yang lebih kompleks dibandingkan lokasi studi Xi dkk. (2022), karena dominasi proses konveksi lembap, pengaruh interaksi laut-atmosfer, serta kondisi orografis di wilayah maritim tropis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil klasifikasi dan estimasi PBL tahun 2024 di tiga stasiun (Juanda Surabaya, Pontianak, dan Manado), diperoleh beberapa temuan. Pertama, klasifikasi PBL pada pukul 00.00 UTC secara konsisten didominasi oleh kondisi *Stable Boundary Layer* (SBL) di seluruh stasiun. Kedua, pada pukul 12.00 UTC mulai terlihat peningkatan variasi tipe PBL dengan *kemunculan Neutral Boundary Layer* (NBL) dan *Convective Boundary Layer* (CBL), terutama di wilayah Juanda dan Manado. Ketiga, estimasi ketinggian PBL menunjukkan variasi musiman yang jelas, dengan nilai tertinggi umumnya terjadi pada periode JJA dan MAM, serta terendah pada DJF. Keempat, terdapat perbedaan hasil antar metode, di mana metode gradien suhu potensial menghasilkan estimasi PBL yang lebih rendah, sedangkan *parcel method* cenderung memberikan estimasi tertinggi. Dinamika PBL di wilayah Indonesia memiliki variabilitas yang kuat secara temporal dan spasial, serta sangat dipengaruhi oleh kondisi regional dan karakteristik atmosfer maritim tropis. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam memahami struktur lapisan batas atmosfer di Indonesia.

REFERENSI

- Allabakash, S., & Lim, S. (2020). Climatology of planetary boundary layer height-controlling meteorological parameters over the Korean Peninsula. *Remote Sensing*, 12(16), 2571. <https://doi.org/10.3390/rs12162571>
- Apriadi, A. (2023). *Analisa Data Radiosonde Untuk Menentukan Ketinggian Planetary Boundary Layer (Pbl) Dengan Menggunakan Gradien Suhu Potensial* (Doctoral Dissertation, Universitas Bina Darma).
- Aryee, J. N. A., Amekudzi, L. K., Preko, K., Atiah, W. A., & Danuor, S. K. (2020). *Estimation of planetary boundary layer height from radiosonde profiles over West Africa during the AMMA field campaign: Intercomparison of different methods*. *Scientific African*, 7, e00228. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00228>.
- Chan, K. M., & Wood, R. (2013). *The seasonal cycle of planetary boundary layer depth determined using COSMIC radio occultation data*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22). <https://doi.org/10.1002/2013JD020147>
- Garratt, J. R. (1994). *Review: the atmospheric boundary layer*. *Earth-Science Reviews*, 37(1), 89–134. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90026-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90026-4)
- Garratt, J. R., Wyngaard, J. C., & Francey, R. J. (1982). *Winds in the atmospheric boundary layer-prediction and observation*. *Journal of Atmospheric Sciences*, 39(6), 1307-1316.
- Guo, J., Liu, B., Gong, W., Shi, L., Zhang, Y., Ma, Y., ... & Xu, X. (2021). *First comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(4), 2945-2958. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2945-2021>
- Gu, J., Zhang, Y., Yang, N., & Wang, R. (2020). *Diurnal variability of the planetary boundary layer height estimated from radiosonde data*. *Earth and Planetary Physics*, 4(5), 1–14. <https://doi.org/10.26464/epp2020042>.
- Hamdi, S., Radiana, A., Tanti, D. A., Adetya, E., Sumaryati, Setyawati, W., ... & Noviasuti, N. (2023, November). *The Estimation of Planetary Boundary Layer Height Over Land and Peat Fire-Prone Area in Kabupaten OKI of South Sumatra Indonesia Using Radiosonde Data*. *International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment* (pp. 65-74). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0740-9_7.
- Hashiguchi, H., Fukao, S., Tsuda, T., Yamanaka, M. D., Tobing, D. L., Sribimawati, T., Harijono, S. W. B., & Wiryosumarto, H. (1995). *Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L band clear-air Doppler radar: Initial results*. *Radio Science*, 30(4), 1043–1054. <https://doi.org/10.1029/95RS00653>.
- Kurzeja, R. J., Berman, S., & Weber, A. H. (1991). *A climatological study of the nocturnal planetary boundary layer*. *Boundary-layer meteorology*, 54(1), 105-128. <https://doi.org/10.1007/BF00119415>.
- Li, H., Liu, B., Ma, X., Jin, S., Ma, Y., Zhao, Y., & Gong, W. (2021). *Evaluation of retrieval methods for planetary boundary layer height based on radiosonde data*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(9), 5977–5986. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5977-2021>.
- Li, H., Liu, B., Ma, X., Jin, S., Wang, W., Fan, R., ... & Gong, W. (2023). *Estimation of planetary boundary layer height from lidar by combining gradient method and machine learning algorithms*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3329122>.
- Liu, S., & Liang, X.-Z. (2010). *Observed Diurnal Cycle Climatology of Planetary Boundary Layer Height*. *Journal of Climate*, 23(21), 5790–5809. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3552.1>
- Mehta, S. K., Ratnam, M. V., Sunilkumar, S. V., Rao, D. N., & Krishna Murthy, B. V. (2016). *Diurnal variability of the atmospheric boundary layer height over a tropical station in the Indian monsoon region*. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-542>
- Seidel, D. J., Ao, C. O., & Li, K. (2010). *Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D16). <https://doi.org/10.1029/2009JD013680>
- Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (R. B. Stull, Ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>.
- Su, T., Li, Z., & Kahn, R. (2020). *A new method to retrieve the diurnal variability of planetary boundary layer height from lidar under different thermodynamic stability conditions*. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111519. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111519>.
- Vogelezang, D. H. P., & Holtslag, A. A. M. (1996). *Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations*. *Boundary-Layer Meteorology*, 81(3), 245-269. <https://doi.org/10.1007/bf02430331>.
- Wang, Z., Xue, L., Shin, H. H., Chu, Y., & Li, W. (2024). *Understanding Processes Controlling the Temporal and Spatial Variations of PBL Structures Over the ARM SGP Site* (No. DOE-CUB-SC0020171). Univ. of Colorado, Boulder, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/2480894>.
- Xi, X., Zhang, Y., Gao, Z., Yang, Y., Zhou, S., Duan, Z., & Yin, J. (2022). *Diurnal climatology of correlations between the planetary boundary layer height and surface meteorological factors over the contiguous United States*. *International Journal of Climatology*, 42(10), <https://doi.org/5092-5110>. [10.1002/joc.7521](https://doi.org/10.1002/joc.7521).
- Zhang, D., Comstock, J., Sivaraman, C., Mo, K., Krishnamurthy, R., Tian, J., ... & Roldán-Henao, N. (2025). *Best estimate of the planetary boundary layer height from multiple remote sensing measurements*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(14), 3453-3475. <https://doi.org/10.5194/amt-18-3453-2025>.