



Identifikasi Potensi Turbulensi di Wilayah Penerbangan Indonesia Berdasarkan Analisis *Richardson Number* (Ri) Menggunakan Data ECMWF ERA5 (Studi Kasus Tahun 2022)

Identification of Turbulence Potential in Indonesian Airspace Based in Richardson Number (Ri) Analysis Using ECMWF ERA5 Data (Case Study of 2022)

Rafli Muhammad Haris Riswanto^{1*}, Musa Ali Mustofa¹, Immanuel Jhonson Arizona Saragih²

¹Program Studi Sarjana Meteorologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Kota Bandung

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Meteorologi Kualanamu, Deli Serdang

*Email: rafli290401@gmail.com

Naskah Masuk: 11 Juli 2024 / Naskah Diterima: 3 Desember 2024 / Naskah Terbit: 31 Desember 2024

Abstrak. Turbulensi merupakan fenomena atmosfer yang memiliki dampak signifikan terhadap keselamatan penerbangan, terutama di wilayah Indonesia yang memiliki kondisi cuaca tropis kompleks dan arus lalu lintas penerbangan yang padat. Identifikasi dan pemetaan potensi turbulensi menjadi sangat penting untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan potensi turbulensi di wilayah jelajah pesawat di Indonesia dengan menggunakan Richardson Number (Ri) pada tahun 2022. Data yang digunakan berasal dari European Centre for Medium – Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Version 5 (ERA5) dan data observasi radiosonde. Data ERA5 digunakan untuk menghitung Ri, yang mampu mendeteksi potensi turbulensi berdasarkan parameter meteorologi seperti kecepatan angin dan suhu. Hasil perhitungan Ri dikumpulkan secara bulanan dan tahunan untuk dianalisis secara temporal dan spasial. Validasi dilakukan menggunakan data radiosonde untuk memverifikasi kejadian turbulensi dan parameter meteorologi di berbagai tingkat atmosfer. Hasil pengamatan spasial di wilayah Indonesia menunjukkan adanya kejadian turbulensi signifikan pada tanggal 18 Januari, 2 Juli, dan 26 Desember 2022, dengan fluktuasi harian yang mencolok. Secara geografis, daerah di sepanjang pantai selatan Jawa dan Sumatera, serta beberapa wilayah di Kalimantan dan Papua, cenderung memiliki frekuensi turbulensi yang lebih tinggi. Pola ini dipengaruhi oleh kondisi cuaca musiman dan fitur geografis lokal yang kompleks. Validasi data menunjukkan kesesuaian yang baik antara data ERA5 dan pengukuran radiosonde untuk parameter suhu, meskipun terdapat perbedaan signifikan pada komponen angin zonal dan meridional. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat kepercayaan terhadap peta potensi turbulensi yang dihasilkan dapat ditingkatkan dengan pengintegrasian data lokal dan pengembangan metode validasi lebih lanjut untuk komponen angin. Hal ini menyoroti pentingnya penggunaan data lokal yang akurat dalam upaya prediksi dan antisipasi dampak turbulensi secara efektif dalam penerbangan di wilayah Indonesia.

Kata Kunci: Turbulensi, *Richardson Number*, ERA5, Radiosonde

Abstract. *Turbulence is an atmospheric phenomenon that significantly impacts aviation safety, particularly in Indonesia, which features complex tropical weather conditions and dense air traffic. The identification and mapping of turbulence potential are crucial for improving aviation safety and operational efficiency. This study aims to map the turbulence potential in Indonesian*

flight regions using the Richardson Number (Ri) for the year 2022. The data utilized in this research are sourced from the European Centre for Medium – Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Version 5 (ERA5) and radiosonde observations. ERA5 data were employed to calculate Ri, which can detect turbulence potential based on meteorological parameters such as wind speed and temperature. Ri calculations were aggregated monthly and annually for temporal and spatial analysis. Validation was conducted using radiosonde data to verify turbulence events and meteorological parameters across various atmospheric levels. Spatial observations across Indonesia revealed significant turbulence events on January 18, July 2, and December 26, 2022, with notable daily fluctuations. Geographically, regions along the southern coasts of Java and Sumatra, as well as certain areas in Kalimantan and Papua, exhibited higher frequencies of turbulence. These patterns are influenced by seasonal weather conditions and complex local geographical features. Data validation demonstrated good agreement between ERA5 data and radiosonde measurements for temperature parameters, although significant differences were found in the zonal and meridional wind components. This indicates that the reliability of the generated turbulence potential maps could be enhanced by integrating local data and further refining validation methods for wind components. These findings highlight the importance of utilizing accurate local data to effectively predict and mitigate the impacts of turbulence on aviation in Indonesia.

Keywords: Turbulence, Richardson Number, ERA5, Radiosonde

Pendahuluan

Keselamatan penerbangan sangat bergantung pada prakiraan cuaca yang akurat dan pengamatan udara atas yang mumpuni dan berkesinambungan. Pilot, maskapai penerbangan, dan petugas lalu lintas udara membutuhkan informasi cuaca yang tepat untuk mengambil tindakan pencegahan dan menghindari daerah dengan risiko turbulensi tinggi ^{[1][2]}. Turbulensi merupakan fenomena atmosfer yang dapat menyebabkan pesawat mengalami guncangan atau getaran akibat perubahan mendadak dalam aliran udara ^[3]. Hal ini dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti fluktuasi suhu dan kelembaban atmosfer, ketidakstabilan udara, atau perubahan dalam kecepatan dan arah angin ^[4]. Turbulensi biasanya terbagi menjadi tiga jenis utama: turbulensi konvektif, turbulensi mekanikal, dan turbulensi windshear ^{[5][6]}.

Untuk mendeteksi adanya turbulensi, digunakan berbagai indeks yang dihitung dari berbagai parameter meteorologi. Salah satu indeks yang sering digunakan adalah Richardson Number (Ri) ^{[4][7]}, yang mengukur tingkat ketidakstabilan atmosfer dengan membandingkan gradien temperatur dan gradien kecepatan angin dalam lapisan udara tertentu. Nilai Ri yang rendah menandakan atmosfer yang cenderung tidak stabil dan berpotensi terjadi turbulensi ^[4].

Analisis data radiosonde periode tahun 2018 – 2023 dari beberapa kota di lima pulau Indonesia (Gambar 1) menunjukkan bahwa data observasi pada tahun 2022 merupakan yang paling lengkap. Kelengkapan dan keakuratan data observasi sangat penting untuk memverifikasi hasil perhitungan turbulensi. Oleh karena itu, diperlukan data radiosonde terbaru dan lengkap guna memastikan konsistensi hasil analisis dengan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 1. Ketersediaan data radiosonde periode tahun 2018 – 2023 di beberapa kota di lima pulau di Indonesia

Pesawat komersial umumnya beroperasi dalam rentang ketinggian antara 30.000 – 40.000 ft, dengan batas maksimum yang diizinkan mencapai 42.000 ft. Penerbangan jarak pendek seringkali dilakukan pada ketinggian antara 25.000 – 35.000 ft (370 – 250 hPa), sementara penerbangan jarak jauh cenderung berada di ketinggian antara 35.000 – 40.000 ft (250 – 200 hPa).

Salah satu kejadian turbulensi yang tercatat pada tahun 2022 adalah pada penerbangan GA 608 tanggal 29 Mei 2022 dari Makasar, Sulawesi Selatan, menuju Palu, Sulawesi Tengah. Akibat turbulensi ini, pesawat mengalami keterlambatan dalam proses pendaratan hingga 20 menit dan melakukan go – around. Analisis data BMKG menunjukkan bahwa pada tanggal tersebut, antara pukul 14.30 hingga 15.00 WITA, terdeteksi pertumbuhan awan konvektif yang intensif di sekitar Teluk Palu, yang berpotensi menyebabkan perubahan signifikan dalam arah dan kecepatan angin di jalur pendaratan, serta mengidentifikasi adanya windshear dengan kecepatan mencapai sekitar 29 kt (49 km/jam).

Penerbangan di Indonesia memegang peranan vital dalam sistem transportasi masyarakat. Mengingat frekuensi penerbangan yang tinggi, fenomena turbulensi merupakan ancaman serius terhadap keselamatan penerbangan, yang dipengaruhi oleh faktor – faktor meteorologi [8]. Analisis kejadian turbulensi merupakan langkah penting dalam memahami potensi terjadinya turbulensi di wilayah Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis indeks parameter Ri yang dapat mengidentifikasi potensi turbulensi di Indonesia pada tahun 2022, yang memiliki data radiosonde yang cukup lengkap, menggunakan data European Centre for Medium – Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Version 5 (ERA5). Data ERA5 adalah data reanalisis atmosfer global yang menyediakan informasi meteorologi dengan resolusi temporal dan spasial cukup tinggi, sehingga banyak digunakan dalam penelitian meteorologi dan klimatologi [9]. Selain itu, dalam penelitian ini juga dilakukan verifikasi vertikal dengan data radiosonde dari beberapa lokasi yang memiliki potensi turbulensi signifikan.

Metode Penelitian

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup data ERA5 dan data radiosonde untuk analisis kondisi atmosfer vertikal saat terjadinya turbulensi. Secara lebih rinci, data yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *ECMWF Reanalysis Version 5 (ERA5)*: Data ini dikeluarkan oleh *European Centre for Medium – Range Weather Forecasts (ECMWF)* dan menggantikan ERA – Interim yang berakhir pada akhir Agustus 2019. ERA5 memiliki peningkatan resolusi baik secara horizontal maupun vertikal [9]. Dalam penelitian ini, data ERA5 digunakan sebagai data historis untuk menghitung indeks turbulensi. Data ini mencakup periode dari 1 Januari 2022 hingga 31 Desember 2022.
2. *Data Radiosonde*: Data ini diperoleh dari beberapa stasiun meteorologi di Indonesia dan digunakan sebagai data verifikasi vertikal udara atas. Data radiosonde mencakup distribusi vertikal dari berbagai parameter yang diperlukan untuk menghitung Ri, seperti tekanan udara, suhu udara, kecepatan angin, kelembaban relatif (RH), dan arah angin.

Metode

Penelitian ini secara garis besar terdiri dari beberapa langkah utama, yaitu:

1. Perhitungan indeks turbulensi *Richardson Number (Ri)*

Indeks Ri dihitung untuk mengevaluasi *shear* angin vertikal dan stabilitas udara, yang diperlukan untuk memahami *Clear Air Turbulence (CAT)* [10]. Kondisi atmosfer dengan nilai $Ri < 0.25$ cenderung mengalami turbulensi [3][5]. Namun, nilai Ri negatif ($Ri < 0.25$) lebih sering terkait dengan turbulensi yang ringan. Persamaan untuk menghitung Ri dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$Ri = \frac{\frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (1)$$



dimana g adalah percepatan gravitasi, θ_v adalah suhu potensial, $\frac{\partial \theta_v}{\partial z}$ adalah gradien vertikal dari suhu potensial, $\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ adalah gradien vertikal dari kecepatan angin horizontal arah U , dan adalah gradien vertikal dari kecepatan angin horizontal arah \bar{V} . Numerator dalam persamaan tersebut menggambarkan stabilitas termal aliran udara melalui perubahan suhu potensial terhadap ketinggian, sementara denominator menggambarkan perubahan kecepatan angin horizontal terhadap ketinggian ^[4]. Aliran turbulen yang dipengaruhi oleh *buoyancy* memiliki kriteria turbulensi dan stabilitas dalam atmosfer berdasarkan indeks Ri, yang dapat dilihat dalam indeks turbulensi yang dihasilkan dari model ^{[11][12]}. Klasifikasi indeks turbulensi ini dapat ditemukan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Ri terhadap indeks turbulensi

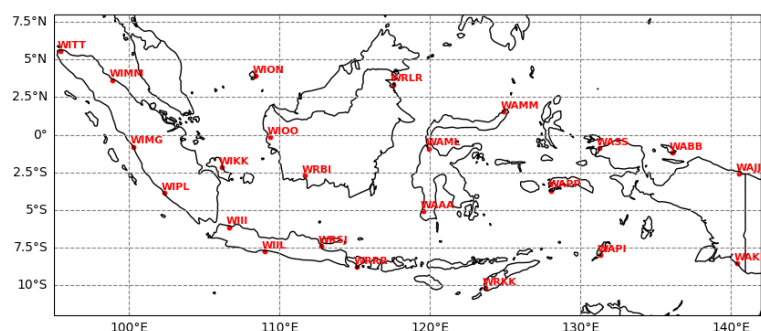
Nilai Ri	Turbulensi	Stabil atau tidak stabil
$Ri < 0$	Ya, konvektif yang kuat	Tidak stabil
$0.0 < Ri < 0.25$	Ya, konvektif yang lemah	Tidak stabil
$Ri > 0.25$	Tidak	Stabil

2. Analisis Parameter Meteorologi

Analisis dilakukan terhadap beberapa parameter meteorologi pada tahun 2022 sebagai referensi untuk memahami penyebab kejadian turbulensi yang diidentifikasi oleh parameter Ri. Analisis mencakup evaluasi kecepatan dan arah angin, serta parameter lain seperti tutupan awan, yang mempengaruhi kondisi penerbangan dan dapat mengidentifikasi faktor – faktor yang berkontribusi pada turbulensi.

3. Verifikasi Hasil

Verifikasi dilakukan secara kualitatif melalui visualisasi spasial dan temporal. Analisis vertikal dilakukan pada wilayah yang menunjukkan indeks turbulensi signifikan pada waktu tertentu, dengan mempertimbangkan stabilitas atmosfer dan menggunakan data radiosonde untuk analisis indeks turbulensi vertikal. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi potensi turbulensi pada ketinggian tertentu dalam atmosfer, dengan memperhatikan kondisi spesifik yang mempengaruhi keamanan penerbangan. Gambar 2 menunjukkan sebaran lokasi pengamatan radiosonde di wilayah Indonesia.



Gambar 2. Sebaran lokasi stasiun meteorologi yang memiliki data observasi radiosonde di Indonesia

Selain itu, dilakukan verifikasi kuantitatif dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) dari parameter indeks turbulensi yang dihasilkan menggunakan Persamaan 2.

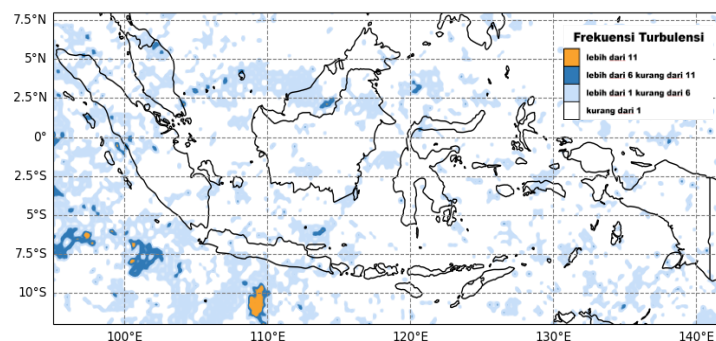
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2} \quad (2)$$

dengan n merupakan jumlah total data observasi radiosonde atau data hasil, S_i merupakan nilai keluaran dari perhitungan nilai R_i dan G_i merupakan nilai observasi pengukuran parameter meteorologi yang akan diverifikasi.

Hasil dan Pembahasan

Peta *Hazard* Frekuensi Turbulensi di Indonesia pada Tahun 2022

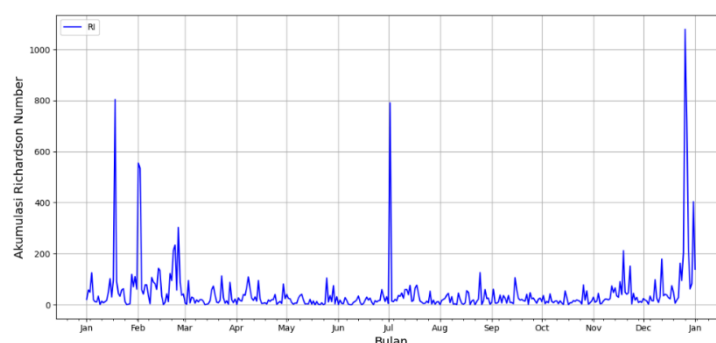
Perhitungan R_i telah dilakukan untuk memetakan kejadian turbulensi di Indonesia pada tahun 2022. Gambar 3 menampilkan peta *hazard* frekuensi kejadian turbulensi di Indonesia berdasarkan perhitungan indeks R_i . Peta ini menggunakan empat skala warna untuk menggambarkan frekuensi turbulensi: oranye untuk frekuensi lebih dari 11 kejadian, biru untuk frekuensi antara 6 hingga 11 kejadian, biru muda untuk frekuensi antara 1 hingga 6 kejadian, dan putih untuk frekuensi kurang dari 1 kejadian. Dari analisis peta, terlihat bahwa daerah dengan tingkat turbulensi tinggi (ditunjukkan dengan warna oranye) terletak di sekitar 10° LS dan 110° BT, dekat dengan bagian selatan Jawa. Daerah dengan tingkat turbulensi sedang (ditunjukkan dengan warna biru) tersebar di berbagai wilayah, khususnya di sekitar Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi. Sementara itu, sebagian besar wilayah menunjukkan tingkat turbulensi rendah (ditunjukkan dengan warna biru muda dan putih), menandakan bahwa kejadian turbulensi jarang terjadi di daerah – daerah tersebut. Gambar ini bermanfaat untuk memahami distribusi dan frekuensi turbulensi di Indonesia, yang memiliki implikasi penting dalam studi penerbangan dan meteorologi.



Gambar 3. Peta *hazard* kejadian turbulensi berdasarkan indeks R_i di Indonesia pada tahun 2022

Analisis Temporal

Berdasarkan analisis *time series* pada Gambar 4, jumlah frekuensi R_i menunjukkan nilai puncak pada tanggal 18 Januari 2022 dengan total kejadian turbulensi sebanyak 804. Pada tanggal 26 Desember 2022, tercatat jumlah yang tinggi mencapai 1079, sedangkan pada tanggal 2 Juli 2022 mencapai 791. Periode – periode ini menunjukkan tingginya aktivitas turbulensi di Indonesia pada tahun 2022. Selanjutnya, untuk memperoleh pemahaman lebih mendetail mengenai distribusi turbulensi dalam rentang waktu harian, dilakukan plot grafik *time series* frekuensi kejadian turbulensi per jam untuk ketiga hari tersebut.

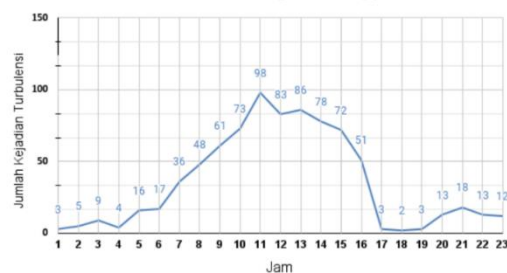


Gambar 4. Grafik *time series* frekuensi kejadian berdasarkan indeks R_i tahun 2022 di Indonesia

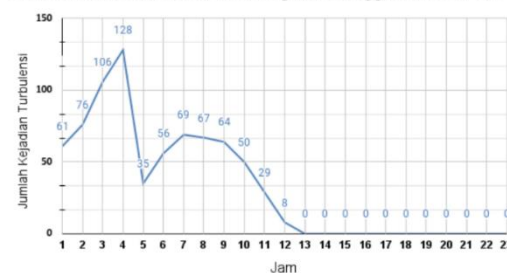
Dari Gambar 5(a), (b), dan (c), terlihat bahwa frekuensi kejadian turbulensi mencapai puncak tertinggi pada waktu – waktu yang berbeda. Pada contoh pertama dari Gambar 5(b) pada tanggal 18 Januari 2022, terlihat bahwa frekuensi meningkat secara signifikan dari dini hari dan mencapai puncak pada pukul 11 pagi, kemudian mengalami penurunan yang cukup tajam menjelang petang dan malam hari. Hal ini berbeda dengan contoh kedua pada Gambar 5(b), yang menunjukkan pola pada musim bulan kering tanggal 2 Juli 2022 dengan puncak frekuensi kejadian turbulensi terjadi pada pukul 4 pagi, diikuti penurunan drastis di jam – jam berikutnya, dan kenaikan kembali pada siang hari. Sedangkan pada Gambar 5(c), contoh terakhir menunjukkan fluktuasi yang signifikan dengan dua puncak frekuensi pada pukul 2 pagi dan pukul 4 sore hari.

Variasi dan perbedaan frekuensi kejadian turbulensi yang terlihat dari Gambar 5(a), (b), dan (c) dapat disebabkan oleh beberapa faktor meteorologi dan kondisi atmosfer. Pertama, siklus harian atau diurnal memainkan peran penting, di mana pemanasan permukaan bumi oleh sinar matahari pada siang hari meningkatkan aktivitas termal yang dapat memicu turbulensi, sementara pendinginan permukaan bumi pada malam hari umumnya mengurangi turbulensi, kecuali dalam kondisi inversi suhu. Kedua, musim dan kondisi cuaca juga mempengaruhi frekuensi turbulensi; misalnya, pada musim kering atau panas, pemanasan yang intens dari permukaan bumi dapat meningkatkan intensitas turbulensi dibandingkan dengan musim hujan atau dingin. Selain itu, variasi ini juga dapat dipengaruhi oleh perbedaan lokal dalam aliran angin, topografi, dan nilai Ri, yang mengukur stabilitas atmosfer dan sering digunakan untuk memprediksi turbulensi. Gabungan dari faktor – faktor ini menyebabkan variasi yang diamati dalam frekuensi kejadian turbulensi pada waktu dan kondisi cuaca yang berbeda.

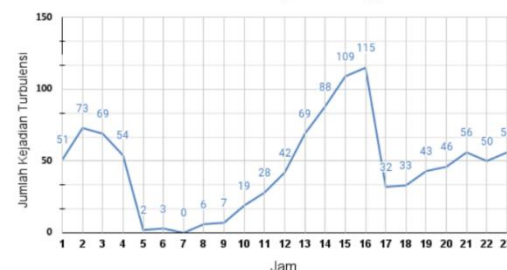
(a) Time Series Richarson Number pada Tanggal 2022-01-18



(b) Time Series Richarson Number pada Tanggal 2022-07-02



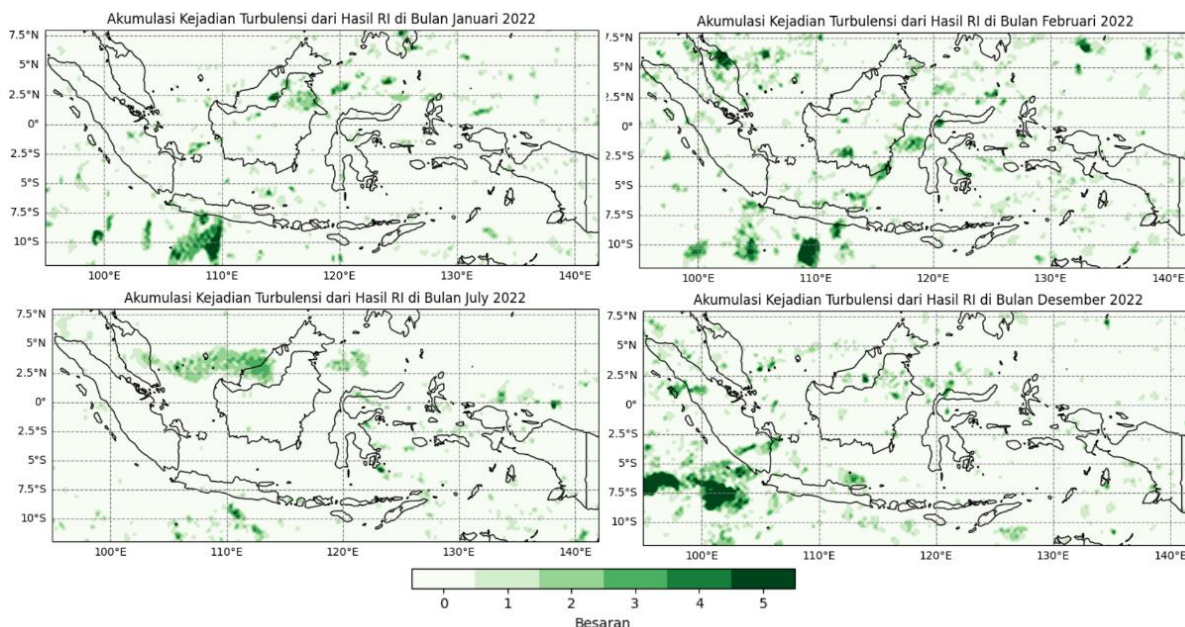
(c) Time Series Richarson Number pada Tanggal 2022-12-26



Gambar 5. Grafik *time series* frekuensi per – jam indeks Ri dengan nilai Ri terbesar di tahun 2022 di Indonesia (waktu dalam LT); (a) tanggal 22 Januari 2022, (b) tanggal 2 Juli 2022, (c) tanggal 26 Desember 2022

Analisis Spasial

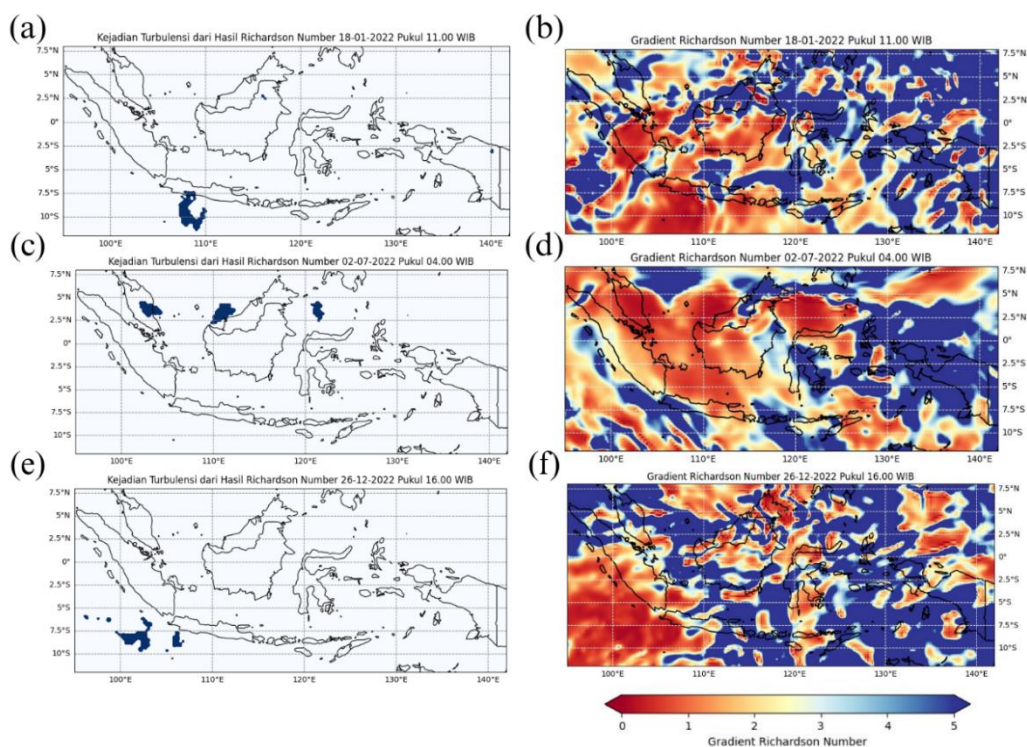
Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa frekuensi turbulensi menyebar di wilayah laut bagian selatan Pulau Jawa pada bulan Januari dan Februari. Selain itu, frekuensi yang tinggi juga teramati pada Bulan November dan Desember di beberapa wilayah Pulau Sumatera. Terlihat distribusi frekuensi yang signifikan di sekitar Pulau Sumatera Utara pada bulan November, dan tersebar di perairan selatan Pulau Sumatera pada bulan Desember. Sementara itu, untuk bulan – bulan lainnya, tidak terlihat adanya frekuensi turbulensi yang signifikan.



Gambar 6. Grafik frekuensi indeks Ri dengan nilai Ri tertinggi pada tahun 2022 di Indonesia (Januari, Februari, Juli, dan Desember)

Gambar 7(a) menampilkan peta distribusi *gradient* Ri pada tanggal 18 Januari 2022 pukul 11.00 LT. Area berwarna merah menunjukkan nilai Ri rendah, yang mengindikasikan potensi turbulensi tinggi, sementara area berwarna biru menunjukkan nilai Ri tinggi yang menandakan stabilitas atmosfer. Wilayah dengan Ri rendah terlihat di sekitar Laut Jawa dan sebagian besar wilayah daratan Jawa, menunjukkan potensi tinggi untuk kejadian turbulensi pada waktu tersebut. Gambar 7(b) menunjukkan hasil pemetaan kejadian turbulensi pada tanggal dan waktu yang sama, dengan area berwarna biru gelap yang mengkonfirmasi adanya turbulensi signifikan di wilayah tersebut. Gambar 7(c) pada bagian tengah atas menampilkan distribusi Ri pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 04.00 LT. Wilayah dengan nilai Ri rendah terlihat di sekitar Selat Malaka dan sebagian wilayah Sumatera, menunjukkan potensi tinggi untuk kejadian turbulensi di wilayah tersebut pada waktu tersebut. Gambar 7(d) di bagian bawah menunjukkan bahwa meskipun tidak seluas pada gambar sebelumnya, turbulensi terjadi di beberapa bagian Sumatera dan sekitar Selat Malaka. Gambar 7(e) pada bagian atas kanan menampilkan distribusi Ri pada tanggal 26 Desember 2022 pukul 16.00 LT. Daerah dengan nilai Ri rendah terlihat tersebar di sekitar perairan selatan Sumatera dan sebagian wilayah Jawa, menunjukkan potensi tinggi untuk kejadian turbulensi di area tersebut pada waktu tersebut. Gambar 7(f) menunjukkan peta kejadian turbulensi yang sesuai, dengan area berwarna biru gelap yang menunjukkan adanya turbulensi signifikan di perairan selatan Sumatera dan beberapa bagian Jawa.

Secara keseluruhan, analisis spasial dan temporal dari peta – peta ini menunjukkan bahwa kejadian turbulensi di Indonesia pada tahun 2022 sangat dipengaruhi oleh variasi musiman dan regional dalam distribusi nilai *gradient* Ri. Perubahan dalam pola angin, kondisi atmosfer lokal, dan faktor – faktor meteorologi lainnya, seperti monsun dan aktivitas siklon, berkontribusi pada variasi frekuensi dan distribusi spasial turbulensi sepanjang tahun.



Gambar 7. *Gradient* indeks Ri dan frekuensi kejadian turbulensi; (a) dan (b) tanggal 22 Januari 2022, (c) dan (d) tanggal 2 Juli 2022, (e) dan (f) tanggal 26 Desember 2022

Selanjutnya yakni analisis parameter meteorologi berdasarkan Indeks Ri, dimana *Gradient potential temperature* menggambarkan perubahan suhu potensial dalam ruang yang dapat mempengaruhi stabilitas atmosfer, sedangkan *windshear* menunjukkan perbedaan kecepatan dan arah angin vertikal yang dapat memengaruhi perkembangan turbulensi dan stabilitas atmosfer. Oleh karena itu, dilakukan analisis terhadap parameter – parameter pembentuk indeks Ri, seperti *gradient potential temperature* dan *windshear*, pada waktu dengan akumulasi nilai Ri tertinggi di Indonesia pada tahun 2022. Tujuannya adalah untuk mengeksplorasi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kejadian turbulensi yang terjadi.

Analisis Spasial Gradien Temperatur Potensial pada Waktu dengan Frekuensi Harian Kejadian Turbulensi Tertinggi Tahun 2022

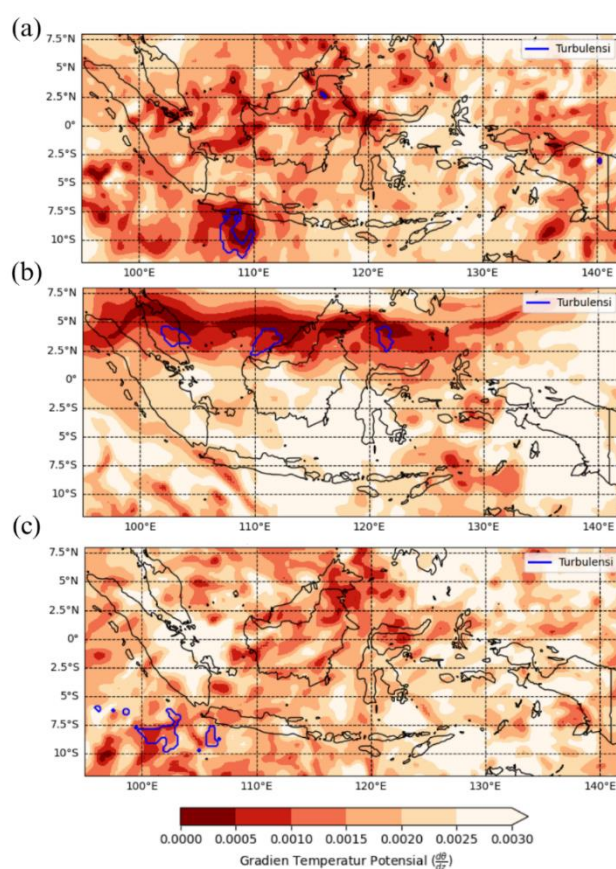
Indeks Ri digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara gradien vertikal suhu atau kecepatan angin dengan efek gaya – gaya yang timbul akibat perbedaan kepadatan udara. Dari perspektif temperatur potensial, peningkatan nilai Ri dengan meningkatnya temperatur potensial menunjukkan bahwa lapisan atmosfer menjadi lebih stabil seiring dengan meningkatnya temperatur potensial. Namun demikian, Ri juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti gradien kecepatan angin dan gradien temperatur potensial.

Gambar 8 memperlihatkan hubungan antara temperatur potensial dan kejadian turbulensi di wilayah Indonesia pada tiga tanggal berbeda di tahun 2022. Pada tanggal 22 Januari (Gambar 8a), terlihat adanya turbulensi di selatan Pulau Jawa dan Bali meskipun wilayah ini memiliki temperatur potensial yang tinggi (warna merah tua). Secara umum, temperatur potensial yang tinggi biasanya menunjukkan atmosfer yang lebih stabil karena nilai Ri cenderung tinggi, menandakan atmosfer yang kurang rentan terhadap turbulensi. Namun, keberadaan turbulensi di wilayah ini menunjukkan bahwa faktor lain seperti gradien kecepatan angin yang signifikan dapat menurunkan nilai Ri dan menyebabkan ketidakstabilan.

Pada tanggal 2 Juli (Gambar 8b), kejadian turbulensi lebih terbatas dan terlihat terutama di sekitar Laut Jawa. Wilayah ini memiliki temperatur potensial yang lebih rendah dibandingkan dengan Januari,

menunjukkan stabilitas atmosfer yang lebih bervariasi. Meskipun begitu, kehadiran turbulensi menunjukkan bahwa daerah dengan nilai Ri yang lebih rendah, mungkin disebabkan oleh gradien kecepatan angin yang tajam, masih ada meskipun temperatur potensial lebih rendah.

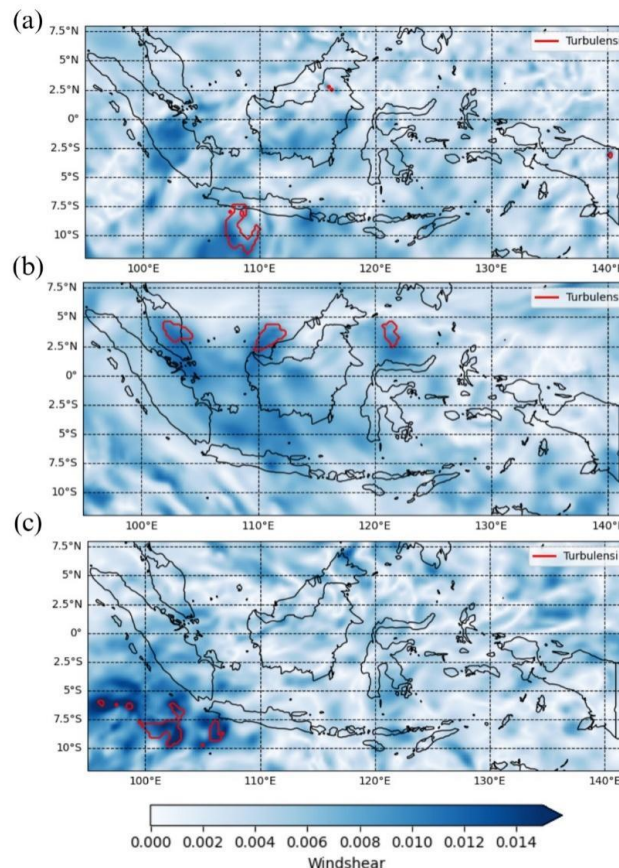
Pada tanggal 26 Desember (Gambar 8c), terlihat adanya turbulensi kembali di selatan Pulau Jawa dan Bali, serta di sekitar Laut Jawa, dengan latar belakang temperatur potensial yang tinggi. Hal ini menegaskan bahwa meskipun temperatur potensial yang tinggi biasanya menunjukkan lapisan atmosfer yang stabil (nilai Ri tinggi), kecepatan angin yang signifikan atau perubahan arah angin di lapisan atmosfer dapat menciptakan gradien kecepatan yang cukup besar untuk menurunkan Ri dan menyebabkan turbulensi. Dalam semua kasus ini, interaksi antara temperatur potensial yang tinggi dan gradien kecepatan angin memainkan peran kunci dalam memahami dinamika atmosfer yang mempengaruhi turbulensi di wilayah Indonesia.



Gambar 8. Temperatur potensial (*shading*) dengan kejadian turbulensi (*pattern* biru) di waktu dengan frekuensi turbulensi terbesar pada tahun 2022; (a) tanggal 22 Januari 2022, (b) tanggal 2 Juli 2022, (c) tanggal 26 Desember 2022

Analisis Spasial *Windshear* pada Waktu dengan Frekuensi Harian Kejadian Turbulensi Tertinggi Tahun 2022

Gradient Ri menggambarkan kontribusi relatif dari daya apung dan geseran angin (*windshear*) terhadap pembentukan atau penghancuran turbulensi (Stull, 1988). Berdasarkan persamaan Ri , ketika *windshear* tinggi, gradien kecepatan angin yang besar cenderung menyebabkan ketidakstabilan dan meningkatkan turbulensi. Nilai Ri yang tinggi menunjukkan atmosfer yang stabil, di mana efek stabilitas termal lebih dominan daripada *windshear*, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya turbulensi. Sebaliknya, nilai Ri yang rendah atau negatif menunjukkan ketidakstabilan atmosfer, di mana wind shear lebih dominan dan turbulensi lebih mungkin terjadi. Oleh karena itu, *windshear* yang tinggi dapat mengurangi nilai Ri dan meningkatkan potensi terjadinya turbulensi serta ketidakstabilan atmosfer.



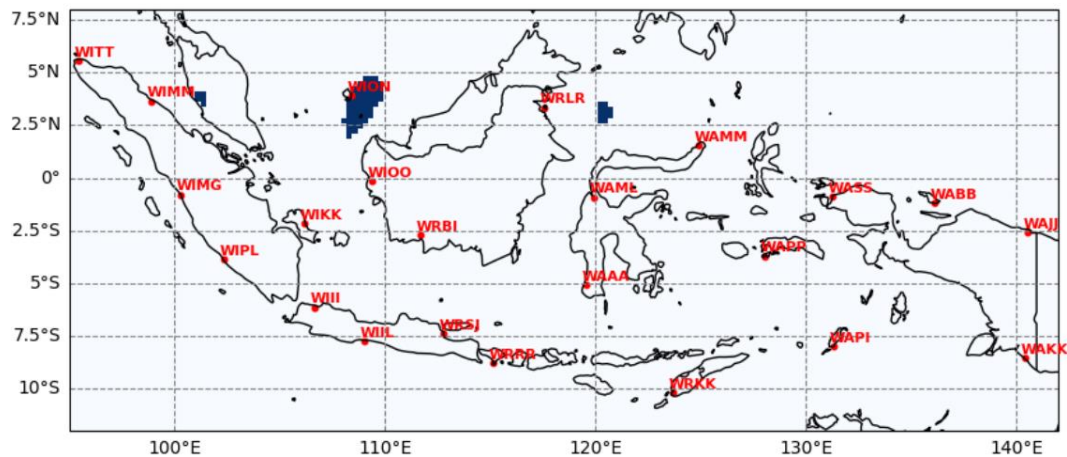
Gambar 9. Vertikal *windshear* (*shading*) dengan kejadian turbulensi (*pattern* merah) di waktu dengan frekuensi turbulensi terbesar pada tahun 2022; (a) tanggal 22 Januari 2022, (b) tanggal 2 Juli 2022, (c) tanggal 26 Desember 2022

Gambar 9(a) menampilkan peta *vertical windshear* pada 18 Januari 2022 pukul 11.00 LT. Daerah dengan intensitas geseran angin vertikal signifikan (*shading* biru gelap) terlihat di sekitar Laut Jawa dan sebagian kecil wilayah daratan Jawa. Pada waktu ini, pola kejadian turbulensi (ditandai dengan pola merah) tampak sejalan dengan area yang memiliki geseran angin vertikal tinggi. Kondisi ini menunjukkan adanya hubungan kuat antara intensitas geseran angin vertikal dan potensi turbulensi. Pada Gambar 9(b), distribusi *vertical windshear* pada 2 Juli 2022 pukul 04.00 LT memperlihatkan pola berbeda. Daerah dengan geseran angin vertikal tinggi terlihat di Sumatera bagian utara dan Selat Malaka. Lokasi kejadian turbulensi yang teridentifikasi kembali menunjukkan korelasi dengan area – area tersebut. Situasi ini mencerminkan peran penting faktor meteorologi lokal, termasuk pengaruh sistem tekanan dan aliran angin musiman (*monsoon*), terhadap dinamika atmosfer di wilayah ini. Gambar 9(c) memperlihatkan peta *vertical windshear* pada 26 Desember 2022 pukul 16.00 LT, di mana geseran angin vertikal signifikan terlihat di perairan selatan Sumatera dan sebagian wilayah Jawa. Konsistensi pola antara lokasi kejadian turbulensi dan intensitas geseran angin vertikal di wilayah tersebut menegaskan bahwa *vertical windshear* adalah indikator penting dalam mengidentifikasi potensi turbulensi.

Secara keseluruhan, ketiga peta tersebut menunjukkan bahwa wilayah dengan *vertical windshear* yang tinggi cenderung mengalami lebih banyak kejadian turbulensi. Hubungan ini dapat dijelaskan melalui dinamika atmosfer, di mana geseran angin vertikal yang tinggi menciptakan kondisi tidak stabil yang memicu turbulensi. Namun, analisis lebih mendalam perlu mempertimbangkan faktor lain, seperti pengaruh kondisi cuaca musiman (misalnya *monsoon* barat dan timur), struktur topografi lokal, dan pola konvektif yang berkontribusi pada pembentukan turbulensi di wilayah Indonesia.

Verifikasi Data ERA5 terhadap Data Observasi Radiosonde

Sebelum melakukan verifikasi terhadap data observasi, dilakukan pencarian kejadian turbulensi di sekitar stasiun meteorologi untuk membandingkan dengan data observasi radiosonde secara vertikal pada tahun 2022. Verifikasi ini dilakukan untuk dua sampel dari Stasiun Meteorologi Ranai, yang merupakan wilayah dengan kejadian turbulensi, dan dua sampel dari Stasiun Meteorologi Jayapura, yang merupakan wilayah tanpa kejadian turbulensi, pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT. Proses verifikasi melibatkan analisis terhadap parameter meteorologi yang menjadi komponen pembentuk indeks Ri di wilayah yang memiliki nilai Ri dan data radiosonde yang dapat diverifikasi.

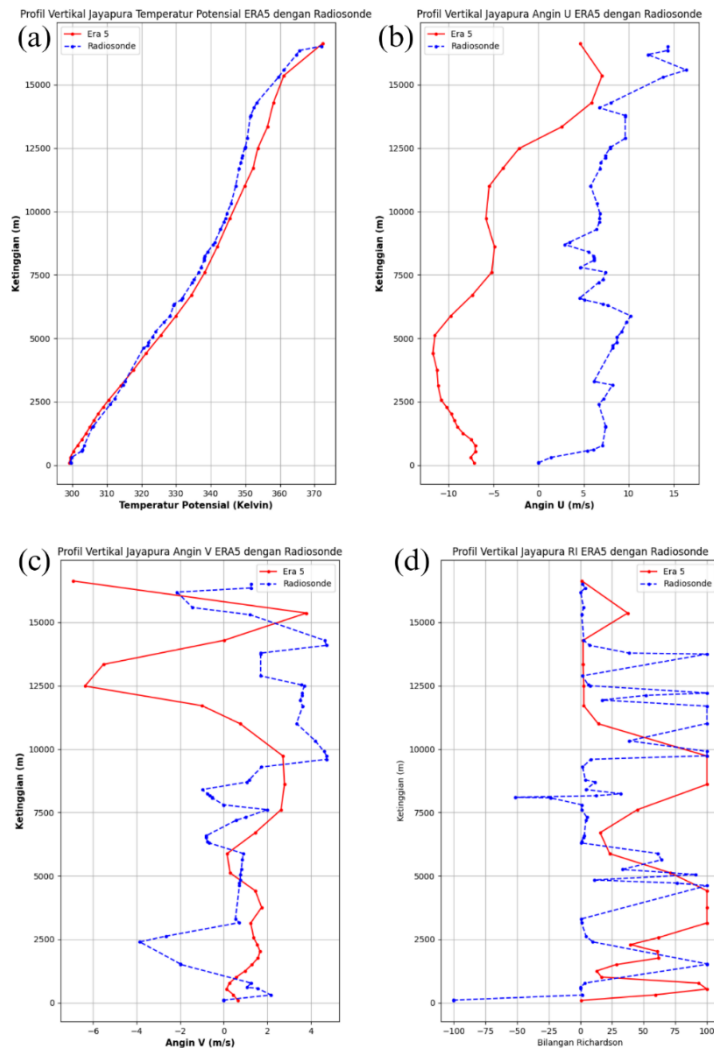


Gambar 10. Peta spasial kejadian turbulensi di Stasiun Ranai pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT

Berdasarkan Gambar 11(a), verifikasi profil vertikal untuk parameter temperatur potensial di Stasiun Meteorologi Jayapura pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT menunjukkan bahwa data dari ERA5 dan radiosonde memiliki pola yang sangat serupa. Ini menunjukkan konsistensi antara kedua sumber data dalam mendeskripsikan distribusi vertikal temperatur di atmosfer. Kesamaan ini mengindikasikan bahwa model ERA5 mampu mereproduksi distribusi vertikal temperatur dengan baik.

Gambar 11(b) dan Gambar 11(c) menunjukkan hasil verifikasi untuk parameter angin zonal dan meridional. Pada plot angin zonal (U), terlihat bahwa data ERA5 menunjukkan arah angin yang lebih stabil dengan ketinggian, sementara data radiosonde menunjukkan variasi yang lebih besar. Pada ketinggian rendah, arah angin zonal dari radiosonde cenderung lebih bervariasi dengan beberapa nilai negatif (ke barat), sedangkan data ERA5 menunjukkan nilai yang lebih stabil dan positif (ke timur). Untuk angin meridional (V), data ERA5 menunjukkan arah yang stabil dengan nilai positif (ke utara) pada beberapa ketinggian, sedangkan data radiosonde menunjukkan variasi yang lebih besar dengan beberapa nilai negatif (ke selatan). Perbedaan ini dapat disebabkan oleh faktor seperti resolusi temporal dan spasial dari data ERA5 yang mungkin tidak dapat menangkap variasi kecil yang terdeteksi oleh radiosonde.

Indeks Ri merupakan parameter kunci dalam analisis stabilitas atmosfer, dihitung dari perbandingan antara potensi pertumbuhan turbulensi (yang dipengaruhi oleh gradien angin) dan stabilitas atmosfer (yang dipengaruhi oleh gradien temperatur). Gambar 11(d) menunjukkan perbedaan nilai Ri antara data ERA5 dan radiosonde. Data ERA5 menunjukkan nilai Ri yang lebih tinggi pada beberapa lapisan atmosfer, menunjukkan stabilitas atmosfer yang lebih besar atau potensi turbulensi yang lebih rendah. Sebaliknya, data radiosonde menunjukkan variasi yang lebih besar dalam nilai RI, dengan beberapa lapisan atmosfer menunjukkan nilai Ri yang lebih rendah, menandakan potensi turbulensi yang lebih tinggi. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh perbedaan dalam pengukuran angin dan temperatur antara kedua sumber data. Faktor seperti resolusi data, metode pengukuran, dan waktu pengambilan data dapat mempengaruhi perbedaan ini.

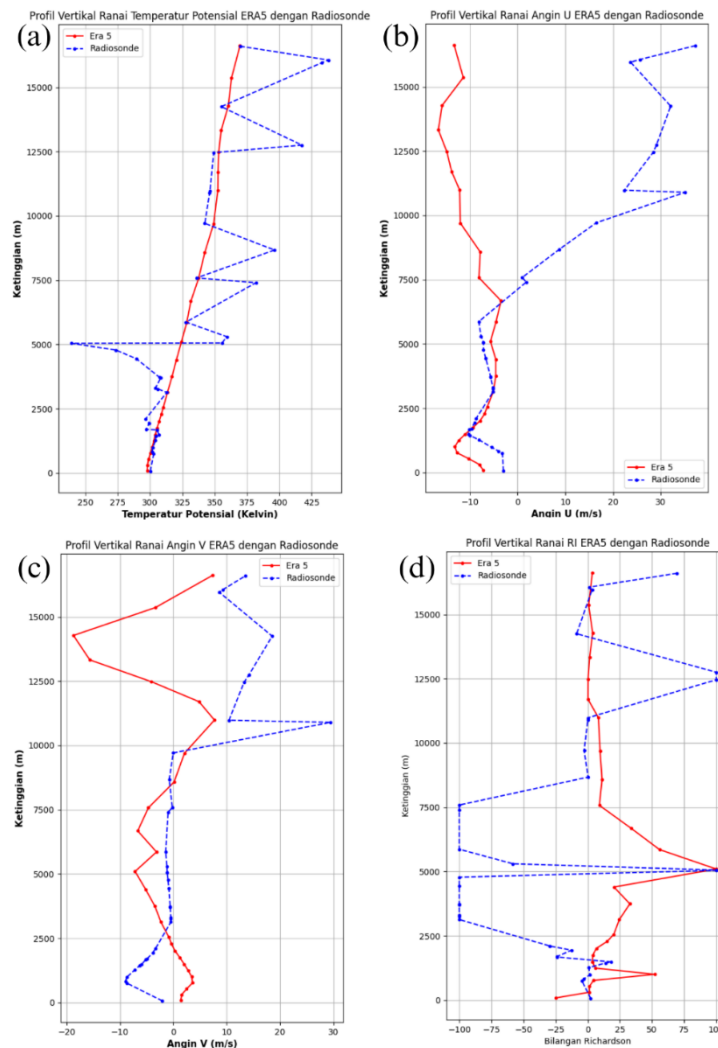


Gambar 11. Grafik profil parameter antara data ERA5 dan data radiosonde Stasiun Meteorologi Jayapura pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT; (a) grafik profil temperatur potensial, (b) grafik profil angin zonal (u), (c) grafik profil angin meridional (v), (d) grafik profil Ri

Pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT, terdapat kejadian turbulensi yang tercatat di wilayah Stasiun Meteorologi Ranai, Natuna Kepulauan Riau, ditandai dengan pola biru pada Gambar 12. Analisis profil parameter antara data ERA5 dan radiosonde di Stasiun Meteorologi Ranai menunjukkan pola yang signifikan pada tanggal dan waktu tersebut. Pada profil temperatur potensial (Gambar 12(a)), data ERA5 dan radiosonde menunjukkan pola yang sangat mirip, menunjukkan konsistensi yang baik dalam menggambarkan distribusi vertikal temperatur di atmosfer. Kesamaan ini menunjukkan bahwa model ERA5 mampu mereproduksi distribusi vertikal temperatur dengan baik. Namun, profil temperatur potensial dari radiosonde di Ranai menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan ERA5. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Daerah Natuna yang dikelilingi oleh lautan dan topografi pulau dapat memperkuat angin lokal dan menyebabkan gangguan turbulen yang memengaruhi distribusi temperatur vertikal. Selain itu, Radiosonde memiliki kemampuan untuk menangkap fluktuasi kecil pada skala lokal dan temporal yang sering kali tidak dapat direpresentasikan oleh model reanalisis global seperti ERA5.

Pada profil angin zonal (U) (Gambar 12(b)) dan angin meridional (V) (Gambar 12(c)), hasil verifikasi mengungkap perbedaan yang signifikan antara data ERA5 dan radiosonde. Data ERA5 menunjukkan arah angin yang lebih stabil dengan ketinggian, sedangkan radiosonde menunjukkan variasi yang lebih

besar pada ketinggian rendah, terutama pada angin zonal yang sering menunjukkan nilai negatif (ke barat). Untuk angin meridional, data ERA5 menunjukkan arah yang stabil dengan nilai positif (ke utara), sementara radiosonde menunjukkan variasi yang lebih besar dengan beberapa lapisan atmosfer menunjukkan nilai negatif (ke selatan). Perbedaan ini dapat diatributkan pada resolusi temporal dan spasial data ERA5 yang mungkin tidak menangkap variasi kecil yang terdeteksi oleh radiosonde. Meskipun demikian, hasil ini menegaskan bahwa penggunaan radiosonde sebagai data validasi tetap krusial untuk memahami dinamika atmosfer pada skala lokal yang sering kali terlewatkan oleh model global.



Gambar 12. Grafik profil parameter antara data ERA5 dan data radiosonde Stasiun Meteorologi Ranai, Natuna Kepulauan Riau pada tanggal 2 Juli 2022 pukul 07.00 LT; (a) grafik profil temperatur potensial, (b) grafik profil angin zonal (u), (c) grafik profil angin meridional (v), (d) grafik profil Ri

Dari hasil analisis nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk profil vertikal (Tabel 2), dapat dilihat bahwa tingkat kesalahan dalam pengukuran parameter meteorologi bervariasi di setiap wilayah. Stasiun Meteorologi Ranai menunjukkan nilai RMSE yang lebih tinggi untuk semua parameter dibandingkan dengan Banda Aceh dan Jayapura. Meskipun demikian, keberadaan turbulensi terdeteksi dengan konsistensi di Ranai, sementara di Banda Aceh dan Jayapura tidak ada kejadian turbulensi yang tercatat. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat tingkat kesalahan yang lebih tinggi di Ranai, keberadaan turbulensi dapat dideteksi secara efektif.

Tabel 2. Nilai RMSE profil vertikal parameter meteorologi dan konsistensi turbulensi di daerah jelajah antara ERA5 dengan radiosonde

Wilayah	Temperatur Potensial	Angin Zonal	Angin Meridional	Konsistensi Turbulensi
Ranai	25.944	19.853	11.648	Konsisten, Turbulen
Banda Aceh	3.183	19.305	10.238	Konsisten, Tidak Turbulen
Jayapura	2.459	14.4	3.68	Konsisten, Tidak Turbulen

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memetakan potensi turbulensi di wilayah Indonesia pada tahun 2022 menggunakan *Richardson Number* (Ri) berdasarkan data ERA5 dan observasi radiosonde. Dengan fokus pada analisis temporal, spasial, dan validasi data, penelitian ini memberikan wawasan tentang dinamika atmosfer dan potensi risiko turbulensi di berbagai wilayah penerbangan di Indonesia. Secara temporal, frekuensi kejadian turbulensi harian tertinggi tercatat pada tanggal 18 Januari, 2 Juli, dan 26 Desember 2022. Analisis spasial menunjukkan distribusi turbulensi yang signifikan di wilayah perairan selatan Jawa selama bulan Januari dan Februari, serta di wilayah Sumatera pada bulan November dan Desember. Pola ini mencerminkan pengaruh dinamika atmosfer regional dan lokal, termasuk aktivitas konvektif dan geseran angin vertikal, yang menjadi pendorong utama kejadian turbulensi.

Hasil validasi data menunjukkan konsistensi yang baik antara data ERA5 dan radiosonde untuk parameter temperatur potensial, meskipun terdapat perbedaan yang signifikan pada parameter angin zonal dan meridional. Di Stasiun Meteorologi Ranai, nilai RMSE untuk temperatur potensial mencapai 25.944, untuk angin zonal 19.853, dan angin meridional 11.648, dengan indikasi adanya kejadian turbulensi. Di Banda Aceh, nilai RMSE untuk temperatur potensial lebih rendah, yaitu 3.183, dengan nilai untuk angin zonal 19.305 dan angin meridional 10.238, serta tidak ada turbulensi yang tercatat. Di Jayapura, nilai RMSE untuk temperatur potensial adalah 2.459, dengan angin zonal 14.4 dan angin meridional 3.68, juga menunjukkan konsistensi data dan tidak ada turbulensi yang terdeteksi. Penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi data ERA5 dan radiosonde dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi turbulensi, meskipun perbedaan dalam parameter angin perlu ditangani untuk meningkatkan akurasi prediksi. Hasil studi ini juga menyoroti pentingnya pengintegrasian data lokal dan pemahaman tentang dinamika atmosfer tropis dalam mendukung keselamatan penerbangan di Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] Komite Nasional Keselamatan Transportasi, "Laporan kejadian turbulensi parah pesawat Airbus A330 – 243 yang dioperasikan oleh Etihad Airways pada tanggal 4 Mei 2016." Diakses: 31 Oktober 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://knkt.go.id/Repo/Files/Laporan/Penerbangan/2014/>
- [2] Komite Nasional Keselamatan Transportasi, "Laporan kejadian turbulensi parah pesawat Airbus HX – 6704 yang dioperasikan oleh Hongkong Airways pada tanggal 7 Mei 2016." Diakses: 31 Oktober 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://knkt.go.id/Repo/Files/Laporan/Penerbangan/2020/>
- [3] T. Kaluza, D. Kunkel, dan P. Hoor, "Analysis of Turbulence Reports and ERA5 Turbulence Diagnostics in a Tropopause – Based Vertical Framework," *Geophys Res Lett*, vol. 49, no. 20, 2022, doi: 10.1029/2022GL100036.
- [4] R. B. Stull, "An introduction to boundary layer meteorology," *An introduction to boundary layer meteorology*, 1988, doi: 10.1007/978 – 94 – 009 – 3027 – 8.
- [5] E. B. Jaeger dan M. Sprenger, "A Northern Hemispheric climatology of indices for clear air turbulence in the tropopause region derived from ERA40 reanalysis data," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 112, no. 20, 2007, doi: 10.1029/2006JD008189.



- [6] J. Ding, B. Hu, X. Zhuge, dan J. Fei, "Distribution Characteristics of Air Turbulence in Troposphere over East Asia," *Authorea Preprints*, 2022.
- [7] J. M. Wallace dan P. V. Hobbs, "Atmospheric science – an introductory survey.," 1977, doi: 10.1088/0031 – 9112/29/6/037.
- [8] M. A. Munandar, J. T. S. Sumantyo, M. P. Hadi, A. Higuchi, M. A. Marfai, dan M. Romy, "Analysis of Aviation Turbulence Distribution Using ADS – B and Spatial Temperature Difference of Himawari – 8 Images on Java Island, Indonesia," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 20, 2023, doi: 10.1109/LGRS.2023.3279848.
- [9] H. Hersbach *dkk.*, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [Dataset]," Copernicus Climate Change Service (C3S).
- [10] G. P. Ellrod dan D. I. Knapp, "An Objective Clear – Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use," *Weather Forecast*, vol. 7, no. 1, 1992, doi: 10.1175/1520 – 0434(1992)007<0150:aocatf>2.0.co;2.
- [11] P. G. Gill dan A. J. Stirling, "Including convection in global turbulence forecasts," *Meteorological Applications*, vol. 20, no. 1, 2013, doi: 10.1002/met.1315.
- [12] J. R. Holton dan G. J. Hakim, *An introduction to dynamic meteorology: Fifth edition*, vol. 9780123848666. 2012. doi: 10.1016/C2009 – 0 – 63394 – 8.

