

IDENTIFIKASI GELOMBANG *MIXED ROSSBY GRAVITY* PADA FLUKTUASI VERTIKAL ATMOSFER DI WILAYAH PADANG, JAKARTA, DAN PONTIANAK MENGGUNAKAN DATA RADIOSONDE DAN GNSS-RO

Identification of Mixed Rossby Gravity Waves in Atmospheric Vertical Fluctuations in The Padang, Jakarta and Pontianak Regions Using Radiosonde and GNSS-RO Data

Alyah Paretessa Cahyarini ^{1)*}, Noersomadi ²⁾, Lesi Mareta ¹⁾, Wardani Retno Palutfi ¹⁾, Disty Nada Almasah ³⁾, Reza Afrilia Putri Haryandi ³⁾

¹⁾ Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

²⁾ Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Sangkuriang, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40135

³⁾ Program Fisika, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Profesor DR. HR Boenyamin No.708, Dukuhbandong, Grendeng, Kec. Purwokerto Utara, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53122

*e-mail: alyah.120290072@itera.ac.id

Intisari

Penelitian ini menganalisis propagasi gelombang *Mixed Rossby Gravity* (MRG) di wilayah Padang, Jakarta, dan Pontianak. Penggunaan data radiosonde dan GNSS-RO dengan metode *high pass filter* menunjukkan bahwa fluktuasi temperatur (T) berpengaruh pada pergerakan massa udara menghasilkan fase hangat saat fluktuasi anomali temperatur (T') positif dan fase dingin saat negatif. Pada Maret-April 2023, Padang mengalami penurunan T' hingga -6 K, sedangkan Jakarta turun hingga -4 K dan Pontianak mengalami penurunan sebesar -5 K di ketinggian 17 km. Selain itu, kelembapan spesifik cenderung menurun seiring dengan ketinggian. Pada ketinggian 0 km kelembapan spesifik mencapai 15 g.kg^{-1} , menunjukkan kondisi atmosfer yang lembap. Namun, di atas 10 km kelembapan spesifik menurun secara signifikan menjadi 0 g.kg^{-1} , menandakan kondisi udara yang semakin kering. Pemanasan terjadi pada Januari-Februari, sedangkan Maret-Mei terjadi pendinginan akibat musim transisi. Penelitian ini juga mengidentifikasi adanya gelombang MRG dipengaruhi oleh angin meridional, fluktuasi T' , dan gaya Coriolis pada tropopause.

Kata Kunci: Anomali Temperatur, Gelombang MRG, GNSS-RO, Radiosonde

Abstract

This research analyzes the propagation of *Mixed Rossby Gravity* (MRG) waves in the regions of Padang, Jakarta, and Pontianak. The utilization of radiosonde and GNSS-RO data with a *high pass filter* method demonstrates that temperature (T) fluctuations influence the movement of air masses, resulting in a warm phase during positive T' fluctuations and a cold phase during negative ones. In March-April 2023, Padang experienced a decrease in T' of up to -6 K, while Jakarta and Pontianak recorded decreases of -4 K and -5 K respectively, at an altitude of 17 km. Additionally, specific humidity tends to decrease with altitude. At 0 km altitude, specific humidity reaches 15 g.kg^{-1} , indicating a humid atmospheric condition. However, above 10 km, specific humidity significantly drops to 0 g.kg^{-1} , indicating increasingly dry air. Warming occurs in January-February, while cooling takes place in March-May due to the transitional season. This study also identifies the presence of MRG waves influenced by meridional winds, T' fluctuations, and Coriolis forces at the tropopause.

Keywords: Temperature Anomaly, MRG Wave, GNSS-RO, Radiosonde

1. PENDAHULUAN

Temperatur merupakan salah satu variabel utama cuaca dan iklim. Hasil pengamatan dan pemodelan distribusi temperatur global adalah hal yang penting sebagai dasar untuk studi dinamika

atmosfer global. Dinamika atmosfer global melibatkan mekanisme kompleks untuk mentransfer energi dari wilayah tropis yang mengalami pemanasan ke wilayah lintang tengah dan kutub yang mengalami pendinginan. Salah satu fenomena penting yang terlibat dalam transfer energi ini adalah sirkulasi atmosfer global

dan jet stream (Hegerl, et al., 2019). Sirkulasi atmosfer global dipengaruhi oleh gelombang atmosfer yang dapat bergerak secara horizontal di atas Samudra Pasifik, yang dikenal sebagai gelombang ekuatorial. Gelombang ekuatorial terdiri dari gelombang Kelvin dan gelombang *Mixed Rossby Gravity* (MRG), dan memiliki pengaruh signifikan terhadap pola sirkulasi atmosfer global serta distribusi curah hujan di berbagai wilayah.

Gelombang MRG merujuk pada jenis gelombang atmosfer yang terbentuk melalui interaksi antara gelombang Rossby dan gelombang gravitas dalam skala horizontal yang lebih besar di atmosfer, terutama karena adanya perubahan aliran *jet stream* dan gradien vortisitas. Gelombang gravitas adalah gelombang yang terjadi akibat pengaruh gravitasi pada atmosfer, dan dapat terjadi baik secara vertikal maupun horizontal. Interaksi antara gelombang Rossby dan gelombang gravitas menghasilkan fenomena yang kompleks dan penting dalam memahami dinamika atmosfer dan perubahan cuaca (Carsten, et al., 2018).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, Gelombang MRG telah terbukti memiliki kontribusi terhadap modulasi dan pengaruh terhadap kejadian hujan ekstrem. Gelombang ini memiliki kemampuan untuk mentransfer energi dan mengubah distribusi konveksi atmosfer, yang dapat mempengaruhi pola hujan dan cuaca lokal (Sandro W. Lubis & Respati, 2020).

Penelitian ini mengidentifikasi gelombang MRG menggunakan data radiosonde dan data *Global Navigation Satellite System Radio Occultation* (GNSS-RO). Penelitian ini berfokus pada anomali temperatur, kelembapan spesifik, komponen angin u dan v , yang merupakan penyimpangan dari nilai rerata tiap variabel.

Anomali temperatur (T') dengan nilai positif menandakan T' yang hangat sementara nilai negatif menandakan T' yang dingin. Dalam artikel ini, kami menganalisis komponen vektor angin horizontal yang terdiri atas komponen barat-timur (komponen zonal) disimbolkan oleh variabel u , dan komponen selatan-utara (komponen meridional) disimbolkan oleh variabel v . Secara definisi matematika nilai positif (negatif) berarti ke arah timur (barat) untuk variabel u , adapun variabel v menunjukkan nilai positif (negatif) berarti ke arah utara (selatan). Artikel ini juga menganalisis kelembapan spesifik (q) yakni variabel non-dimensional yang menandakan kadar satu gram uap air di dalam satu kilogram udara, sehingga dinyatakan dalam satuan g/kg. Anomali positif (negatif) kelembapan spesifik menunjukkan kondisi atmosfer basah (kering). Dengan menggunakan data tersebut, analisis fluktuasi gelombang MRG dapat dilakukan untuk memahami pengaruhnya terhadap aktivitas konvektif di beberapa wilayah di Indonesia.

2. METODE

Sebanyak 3 stasiun pengamatan radiosonde wilayah Padang, Jakarta dan Pontianak digunakan dalam penelitian ini. Stasiun-stasiun tersebut terdaftar pada Badan Meteorologi Dunia (*World Meteorological Organization*, WMO). Data peluncuran radiosonde secara lengkap dapat diunduh pada situs: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Data yang dikumpulkan untuk penelitian ini yaitu temperatur, kelembapan spesifik, komponen angin u dan v pada bulan Maret 2023.

Selain data radiosonde, penelitian ini juga menggunakan data dari 3 wilayah pengamatan yang sama dengan menggunakan data *Global Navigation Satellite System Radio Occultation* (GNSS-RO). Data GNSS-RO yang dimiliki oleh *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR) dapat diunduh pada situs: <https://data.cosmic.ucar.edu/gnss-ro/cosmic2/>. GNSS-RO digunakan untuk mengukur sifat-sifat atmosfer dengan memanfaatkan sinyal dari sistem navigasi global seperti GPS. Data GNSS-RO dalam penelitian ini diperoleh dari satelit COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*). Data yang dikumpulkan untuk penelitian ini yaitu temperatur dan kelembapan spesifik pada 1 Januari – 9 Mei 2023.

2.1 Metode Filtering

Profil Temperatur GNSS-RO dapat diubah ke dalam domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dengan perhitungan *Discrete Fourier Transform* (DFT) (Heckbert, 1995). Secara matematis DFT didefinisikan dengan persamaan:

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \cdot a_n$$

dengan k adalah indeks frekuensi dari koefisien yang akan dihitung ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$), dan N adalah jumlah total data

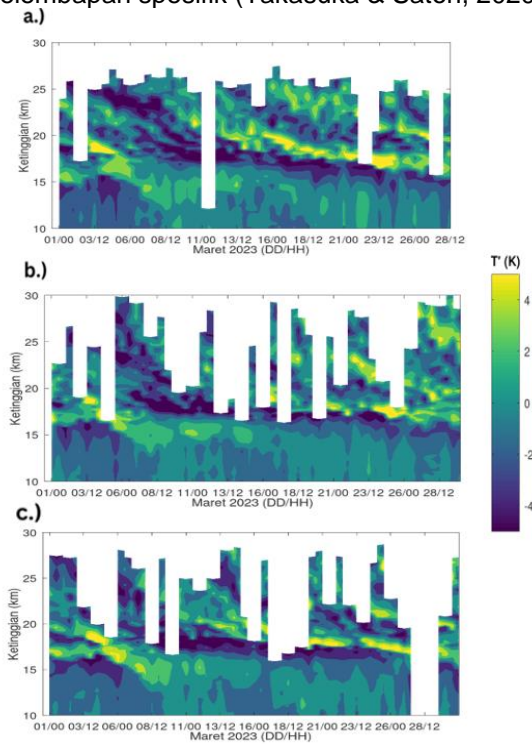
Setelah mendapatkan spektrum frekuensi, dilakukan metode filtering dengan menggunakan *high pass filter* untuk memisahkan komponen frekuensi tinggi yang terkait dengan gelombang MRG. Dari hasil proses filtering tersebut, dapat dilakukan analisis yang terkait dengan gelombang MRG dalam data T atmosfer. Analisis tersebut meliputi identifikasi pergerakan dan evolusi gelombang MRG, serta hubungannya dengan fenomena atmosfer lainnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

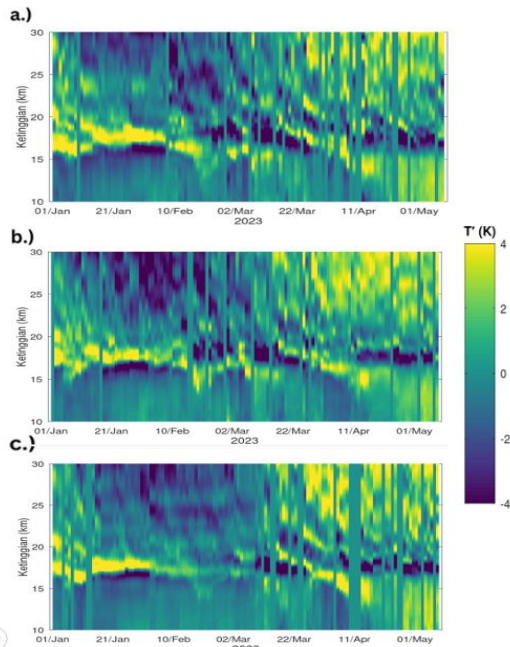
3.1 Fluktuasi Anomali Temperatur

Untuk data radiosonde data T' dihitung dari data pengamatan dikurangi rerata nilai

temperatur pada tiap ketinggian sepanjang bulan Maret 2023. Adapun untuk nilai anomali T dari data GNSS-RO nilai rerata yang digunakan sepanjang 1 Januari–9 Mei 2023. Hal ini juga diterapkan untuk menghitung nilai anomali kelembapan spesifik (Takasuka & Satoh, 2020).



Gambar 3.1 Plot anomali temperatur pengamatan radiosonde di ketinggian 10–30 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak



Gambar 3.2 Plot anomali temperatur pengamatan GNSS-RO di ketinggian 10–30 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Gelombang MRG merupakan penggerak inisiasi awan konvektif yang berkaitan dengan perubahan temperatur (Takasuka & Satoh, 2020). Fluktuasi T terjadi pada rentang ketinggian antara 17 km hingga 30 km pada tiga wilayah

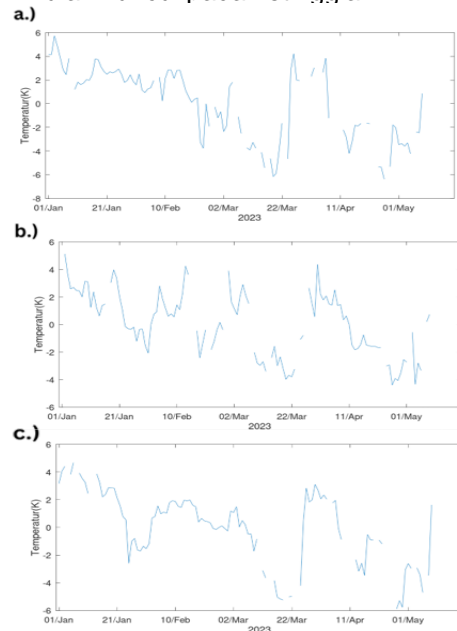
pengamatan, seperti yang diamati dalam Gambar 3.1 dan 3.2.

Fluktuasi nilai T ini menunjukkan adanya perubahan T yang ekstrem pada ketinggian tertentu. Ketika T mencapai nilai maksimum 5 K dan bernilai positif, ini mengindikasikan terjadinya fase hangat di ketinggian tersebut, dengan T yang lebih tinggi dari T rata-rata. Sebaliknya, ketika T mencapai nilai minimum -5 K dan bernilai negatif, ini menunjukkan terjadinya fase dingin dengan T yang lebih rendah dari T rata-rata.

Berdasarkan pengamatan menggunakan radiosonde bulan Maret 2023 pada Gambar 3.1 terlihat T yang dingin dominan di wilayah Padang dan semakin ke timur melewati wilayah Jakarta dan Pontianak T semakin dominan ke hangat. Pada tanggal 3 Maret hingga 6 Maret terjadi T yang hangat pada ketinggian 17–20 km dengan skala 3 harian.

Berdasarkan pengamatan menggunakan GNSS-RO pada Gambar 3.2 T hangat dominan terjadi di bulan Januari dan february pada ketinggian 17–20 Km. Pada ketinggian 17–30 km terdapat fase dingin yang menurun dari bulan Januari hingga Maret. Jadi terlihat fluktuasi T dari data pengamatan GNSS-RO.

Dengan demikian, pengamatan radiosonde dan GNSS-RO menunjukkan terjadinya fluktuasi nilai T mulai muncul pada ketinggian 17 km.



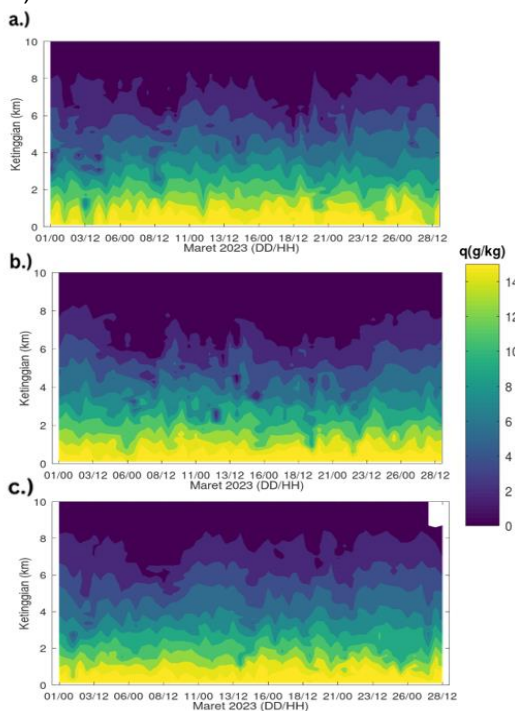
Gambar 3.3 Plot anomali temperatur pengamatan GNSS-RO di ketinggian 17 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Pada plot T yang ditampilkan dalam Gambar 3.3, terdapat penurunan T yang signifikan pada ketinggian 17 km di wilayah Padang, Jakarta, dan Pontianak. Wilayah Padang mengalami penurunan T hingga -6 K, sementara wilayah Jakarta mengalami penurunan hingga -4 K dan wilayah Pontianak mengalami penurunan hingga -5 K. Penurunan T yang signifikan ini terjadi sekitar pertengahan Maret hingga akhir April.

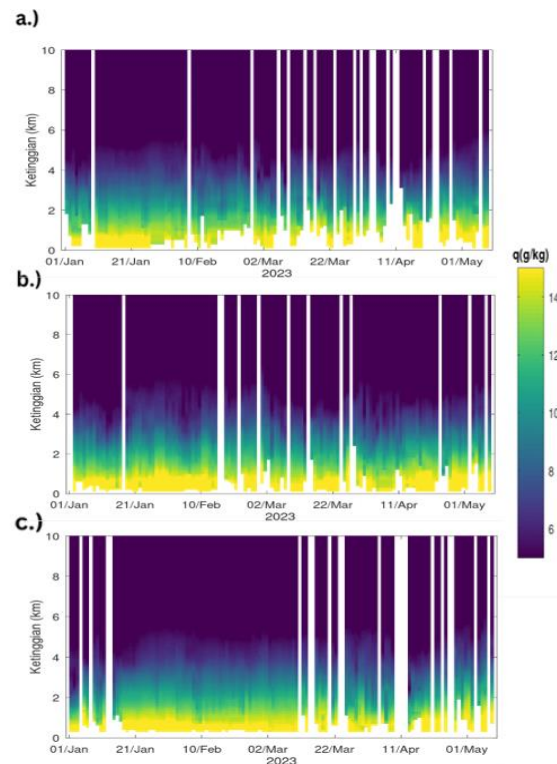
Penurunan T dapat disebabkan oleh pendinginan yang signifikan di kisaran ketinggian 16–19 km, terutama di lapisan tropopause. Gelombang MRG memiliki kemampuan untuk menyebabkan variasi T yang signifikan di lapisan tropopause (Fathullah, et al., 2017). Ketika gelombang MRG melintasi suatu wilayah, hal ini dapat menyebabkan penurunan T pada ketinggian tersebut. Penurunan T pada pertengahan Maret hingga akhir April di ketiga wilayah tersebut, kemungkinan besar karena pengaruh gelombang MRG yang melintasi wilayah-wilayah tersebut. Dengan demikian, gelombang MRG dapat berkontribusi terhadap perubahan T yang signifikan di lapisan tropopause pada wilayah pengamatan radiosonde dan GNSS-RO Padang, Jakarta, dan Pontianak.

3.2 Kelembapan Spesifik

Kelembapan spesifik memiliki pengaruh terhadap densitas udara yang dapat mempengaruhi pola dan karakteristik gelombang MRG dan Kelvin. Di sisi lain, kelembapan relatif tidak memberikan gambaran yang akurat tentang distribusi uap air di atmosfer untuk analisis gelombang MRG karena tidak memperhitungkan efek langsung dari kelembapan terhadap densitas udara. Dalam analisis gelombang MRG, kelembapan spesifik digunakan untuk mengukur sejauh mana atmosfer dari keadaan jenuh dengan uap air. Perbedaan dalam nilai kelembapan spesifik dapat menyebabkan variasi dalam densitas udara yang akan memengaruhi bagaimana gelombang MRG merambat dan berinteraksi di atmosfer (Takasuka & Satoh, 2020).



Gambar 3.4 Plot kelembapan spesifik pengamatan radiosonde di ketinggian 0-10 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak



Gambar 3.5 Plot kelembapan spesifik pengamatan GNSS-RO di ketinggian 0 - 10 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Gambar 3.4 dan 3.5 menunjukkan hubungan antara kelembapan spesifik dan ketinggian atmosfer di lapisan troposfer berkorelasi satu sama lain. Pada ketinggian 0 km (permukaan) kelembapan spesifik mencapai 15 g.kg⁻¹, menunjukkan keadaan atmosfer yang basah. Namun, ketika ketinggian meningkat hingga 10 km kelembapan spesifik menurun secara signifikan menjadi 0 g.kg⁻¹ menandakan udara yang semakin kering. Perubahan kelembapan spesifik dengan ketinggian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah perubahan T dalam atmosfer.

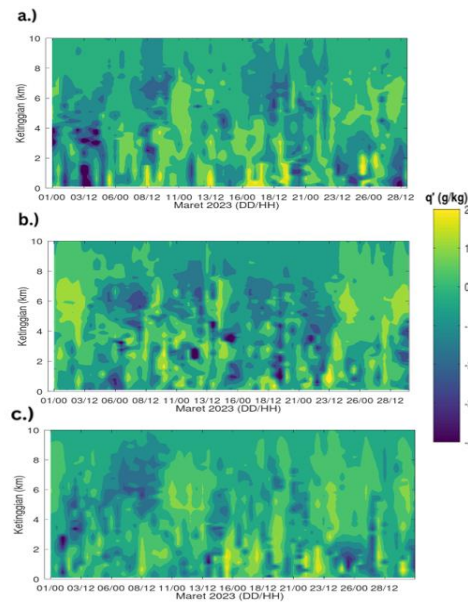
Secara umum, T cenderung menurun seiring dengan ketinggian. Ini karena kapasitas udara untuk menahan uap air menurun bersamaan dengan T yang mengakibatkan penurunan kelembapan spesifik (Turgut & Usanmaz, 2016). Inilah sebabnya kelembapan spesifik menurun seiring dengan naiknya ketinggian lapisan troposfer. Selain itu, proses adiabatik juga berperan dalam mempengaruhi kelembapan spesifik. Proses adiabatik terjadi ketika massa udara naik atau turun secara vertikal tanpa pertukaran panas dengan lingkungan sekitarnya. Ketika massa udara naik, tekanan atmosfer berkurang dan udara mengembang. Akibatnya, udara mengalami pendinginan adiabatik yang menyebabkan penurunan T dan kelembapan spesifik. Ketika udara naik dan mengalami pendinginan adiabatik, kelembapan spesifiknya cenderung menurun karena udara menjadi lebih dingin dan kapasitas untuk menahan uap air menurun (Bleizgys, et al., 2023).

Kelembapan spesifik pada lapisan tropopause-stratosfer di ketinggian 10–30 km sangat rendah atau mendekati 0 karena udara sangat kering pada ketinggian tersebut. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik masing-masing lapisan atmosfer, yaitu lapisan troposfer (permukaan atmosfer) yang mengandung sebagian besar uap air karena banyak proses penguapan dan kondensasi. Sebaliknya, lapisan stratosfer cenderung sangat kering dengan kelembapan yang sangat rendah. Fenomena ini terjadi karena sebagian besar uap air dari troposfer telah mengendap di lapisan tersebut sebagai hujan, salju, atau melalui proses kondensasi lainnya. Oleh karena itu, stratosfer memiliki jumlah uap air yang relatif sedikit. Akibatnya, kelembapan spesifik di stratosfer rendah mendekati nol.

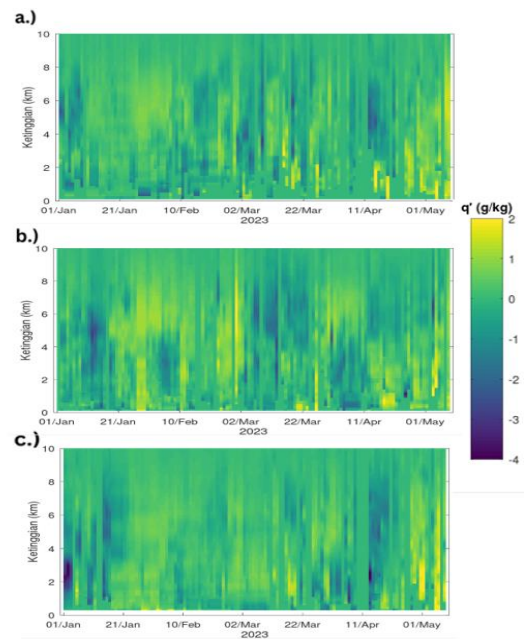
Berbeda dengan stratosfer, di lapisan troposfer kelembapan spesifiknya biasanya lebih tinggi karena lebih banyak uap air yang terkandung di dalamnya. Lapisan stratosfer memiliki sifat yang relatif stabil dan aliran udara di daerah ini terbatas, sehingga udara dengan kandungan uap air yang tinggi dari lapisan di bawahnya jarang mencapai stratosfer. Hal ini juga menyebabkan kelembapan spesifik di stratosfer rendah (Selkirk, *et al.*, 2017).

Perubahan kelembapan spesifik dengan ketinggian dalam lapisan troposfer dapat mempengaruhi pembentukan gelombang MRG. Ketika kelembapan spesifik menurun seiring dengan naiknya ketinggian, ini menunjukkan bahwa udara menjadi lebih kering. Udara yang lebih kering memiliki kecenderungan untuk menjadi lebih stabil secara termal karena memiliki kapasitas yang lebih rendah untuk menyimpan uap air. Stabilitas termal yang lebih tinggi dapat mempengaruhi pola pergerakan udara dan pembentukan gelombang atmosfer, termasuk gelombang MRG (Takasuka, *et al.*, 2019). Selain itu, kombinasi antara perubahan kelembapan spesifik dengan ketinggian dan perubahan T dengan ketinggian dapat menciptakan lingkungan atmosfer yang mendukung pembentukan gelombang MRG (Kiladis, *et al.*, 2016).

Gambar 3.6 dan 3.7 menunjukkan plot q' pada ketinggian 0 km hingga 10 km untuk tiga wilayah pengamatan radiosonde dan GNSS-RO, yaitu Padang, Jakarta, dan Pontianak. Dalam plot tersebut, fluktuasi nilai q' terlihat dengan nilai maksimum mencapai 2 g.kg⁻¹ dan nilai minimum mencapai -4 g.kg⁻¹ di ketiga wilayah pengamatan. Nilai negatif pada q' menunjukkan penurunan kelembapan yang menandakan bahwa udara di atmosfer cenderung lebih kering atau mengandung lebih sedikit uap air dibandingkan dengan nilai kelembapan rata-rata. Di sisi lain, nilai q' yang tinggi menunjukkan peningkatan kelembapan yang signifikan yang menandakan terjadinya peningkatan jumlah uap air dalam udara di wilayah-wilayah tersebut dibandingkan dengan nilai kelembapan rata-rata.



Gambar 3.6 Plot anomali kelembapan spesifik pengamatan radiosonde di ketinggian 0 - 10 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak



Gambar 3.7 Plot anomali kelembapan spesifik pengamatan GNSS-RO di ketinggian 0 - 10 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

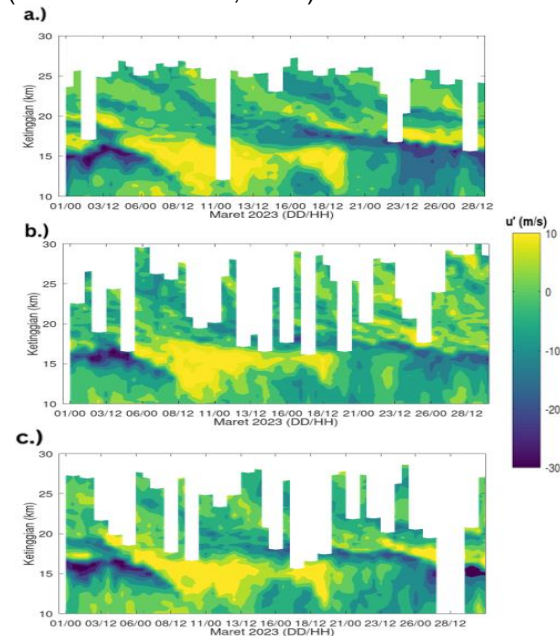
Perubahan vertikal dalam q' di atmosfer, terutama di dekat permukaan menuju troposfer tengah pada ketinggian sekitar 0-10 km, dapat memicu terjadinya gelombang MRG (Paldor, *et al.*, 2018). Gelombang MRG memiliki pengaruh terhadap distribusi kelembapan secara vertikal, sehingga menghasilkan fluktuasi dalam q' seperti yang terlihat dalam plot. Gelombang MRG dapat berinteraksi dengan pola sirkulasi atmosfer dan mempengaruhi distribusi kelembapan di wilayah pengamatan radiosonde dan GNSS-RO Padang, Jakarta, dan Pontianak.

Gelombang MRG dapat mengubah pola sirkulasi atmosfer yang mengakibatkan adveksi

udara lembap atau kering, serta pertukaran uap air di atmosfer (Kiladis, *et al.*, 2016). Akibatnya, fluktuasi pada plot q' , termasuk peningkatan atau penurunan signifikan kelembapan, dapat diindikasikan oleh adanya gelombang MRG yang mempengaruhi keadaan kelembapan relatif di atmosfer pada ketinggian 0–10 km.

3.3 Komponen Angin

MRG berpotensi memicu inisiasi dan perambatan awan konvektif yang merambat ke timur Samudera Hindia (Takasuka, *et al.*, 2019). Analisis komposit menunjukkan bahwa awan konvektif yang merambat ke timur dipicu dari daerah Samudera Hindia bagian Barat Daya. Hasil statistik selama 1982–2012 mendemonstrasikan kopel antara gabungan MRG dan awan konvektif yang sangat kuat dan mempengaruhi inisiasi perambatan ke timur (Takasuka & Satoh, 2020).

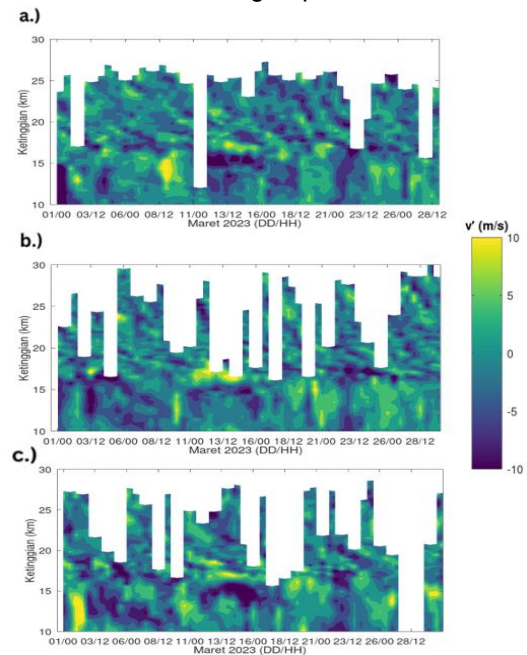


Gambar 3.8 Plot anomali arah angin u pengamatan radiosonde di ketinggian 0 - 30 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Berdasarkan Gambar 3.8, pada rentang ketinggian antara 17 km hingga 30 km, fluktuasi arah angin zonal di wilayah pengamatan radiosonde Padang, Jakarta, dan Pontianak sedikit mempengaruhi pembentukan dan propagasi gelombang MRG. Pada plot arah angin zonal ini lebih terlihat propagasi gelombang Kelvin dibandingkan gelombang MRG.

Pada rentang tanggal 23 sampai 26 Maret 2023, terjadi propagasi gelombang MRG dengan kecepatan angin zonal sebesar 10 m.s⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa angin zonal di wilayah pengamatan memiliki kecepatan yang relatif tinggi ke arah timur. Kecepatan angin zonal yang tinggi dapat mempengaruhi karakteristik gelombang MRG yang terbentuk. Gelombang MRG yang terbentuk pada periode ini akan dipengaruhi oleh kecepatan angin zonal tersebut dan dapat

memiliki karakteristik dan perilaku yang berbeda sesuai dengan fluktuasi angin zonal. Kemudian, pada rentang tanggal 27 sampai 31 Maret 2023, terjadi propagasi gelombang MRG dengan kecepatan angin zonal sebesar 8 m.s⁻¹. Perubahan kecepatan angin zonal ini juga dapat mempengaruhi karakteristik gelombang MRG yang terbentuk. Propagasi gelombang MRG pada analisis angin zonal lebih dominan terlihat pada wilayah Jakarta dibandingkan Padang dan Pontianak. Pada wilayah Jakarta terlihat angin zonal ke arah timur dengan periode 3–5 harian.



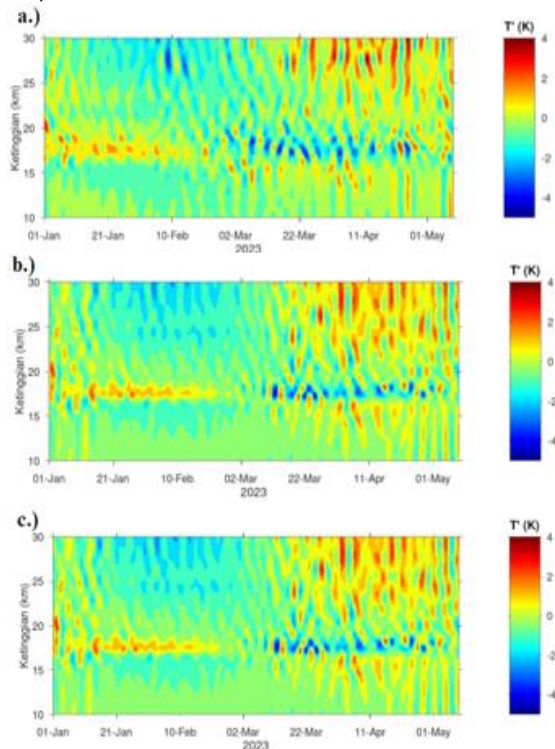
Gambar 3.9 Plot anomali arah angin v pengamatan radiosonde di ketinggian 10 - 30 km a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Berdasarkan Gambar 3.9, fluktuasi yang terlihat melalui pergerakan angin meridional dari selatan (dengan nilai negatif) menunjukkan perpindahan atmosfer secara vertikal yang naik dan turun. Pola fluktuasi ini mungkin merupakan indikasi dari pergerakan gelombang MRG yang melintasi wilayah pengamatan. Arah angin meridional mengalami perubahan amplitudo yang signifikan dengan nilai minimum -10 m.s⁻¹. Hal ini menandakan terjadinya perubahan besar dalam kecepatan angin meridional di wilayah tersebut yang kemungkinan disebabkan oleh pengaruh gelombang MRG.

3.4 Perambatan Gelombang MRG

Gelombang MRG merupakan jenis gelombang atmosfer yang muncul akibat fluktuasi angin meridional dan variasi T pada berbagai tingkatan ketinggian. Fluktuasi angin meridional dapat menghasilkan variasi gaya Coriolis yang memengaruhi arah dan kecepatan pergerakan gelombang. Efek Coriolis menyebabkan arah gelombang cenderung melengkung sejalan dengan garis lintang (meridional). Gaya Coriolis menyebabkan pembelokkan angin ke arah kanan

(timur) dari arah gerakan di belahan bumi utara, dan ke arah kiri (barat) di belahan bumi selatan. Selain itu, fluktuasi T pada berbagai tingkat ketinggian juga menjadi faktor penting dalam pembentukan gelombang ini. Fluktuasi T mengakibatkan perbedaan densitas udara yang memengaruhi pergerakan udara dan pembentukan gelombang MRG (Stephan, *et al.*, 2021).



Gambar 3.10 Plot filtering anomali temperatur pengamatan GNSS-RO a.) Padang b.) Jakarta c.) Pontianak

Berdasarkan data gambar 3.2 T' tiga wilayah pengamatan, dilakukan metode *high pass filter* untuk mengidentifikasi perambatan gelombang MRG. Hasil metode *high pass filter* terdapat pada Gambar 3.10 yang menunjukkan propagasi gelombang MRG dengan periode 3–5 harian. Propagasi gelombang MRG terdeteksi melalui fluktuasi T' secara vertikal di setiap wilayah dari tanggal 1 Januari – 9 Mei 2023.

Gelombang MRG dapat menyebabkan peningkatan atau penurunan T yang terlihat dalam plot T' di masing-masing wilayah. Ketika gelombang MRG melewati suatu titik dalam plot, massa udara yang lebih hangat (positif) atau lebih dingin (negatif) dapat didorong naik atau turun, yang terlihat dalam fluktuasi T . Pola ini mencerminkan perubahan T yang terjadi seiring pergerakan gelombang MRG melalui wilayah yang diamati.

Propagasi gelombang MRG berdasarkan Gambar 3.10 terlihat dalam fluktuasi T' pada ketinggian 16–20 km (tropopause), Perambatan gelombang MRG menyebabkan terjadinya perubahan T pada wilayah yang diteliti. Pada bulan Januari dan Februari 2023 di daerah

Padang, Jakarta, dan Pontianak, T mengalami penghangatan. Sedangkan pada Maret, April, dan Mei, T di daerah tersebut mengalami pendinginan. Pada bulan Desember, Januari, dan Februari di belahan bumi selatan, T cenderung lebih hangat. T hangat meningkatkan penguapan air dari permukaan yang mengakibatkan udara menjadi lebih lembap. Saat udara lembap naik ke ketinggian yang lebih tinggi, uap air dalam udara tersebut mulai berkondensasi membentuk awan. Akumulasi awan dan kondensasi uap air dalam udara yang lebih dingin dapat menyebabkan curah hujan (Poredos, *et al.*, 2022).

T yang dingin cenderung mengurangi kemampuan udara untuk menampung uap air, sehingga mengurangi kelembapan udara. Ini biasanya, mengarah pada penurunan curah hujan (Liu, *et al.*, 2022). Berdasarkan pola umum iklim di Indonesia, bulan Maret dan April cenderung lebih dingin dibandingkan bulan Januari dan Februari. T di Indonesia pada bulan Maret dan April biasanya lebih dingin karena merupakan masa transisi dari musim hujan ke musim kemarau. Selama periode ini, jumlah curah hujan mulai berkurang dan T dapat menjadi lebih dingin akibat curah hujan yang lebih rendah.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian, fase hangat terjadi saat fluktuasi T' mencapai nilai maksimum (positif), sedangkan fase dingin terjadi saat fluktuasi T' mencapai nilai minimum (negatif). Pada pertengahan Maret hingga akhir April 2023, wilayah Padang mengalami penurunan T' hingga -6 K, sementara wilayah Jakarta mengalami penurunan hingga -4 K dan Pontianak mengalami penurunan sebesar -5K di ketinggian 17 km (tropopause).

Analisis juga menunjukkan bahwa ada hubungan antara kelembapan spesifik dengan ketinggian. Kelembapan spesifik cenderung menurun seiring dengan naiknya ketinggian. Di ketinggian < 10 km (troposfer), kelembapan spesifik mencapai 15 g.kg⁻¹, menunjukkan kondisi atmosfer yang lembap. Namun, pada ketinggian di atas 10 km, kelembapan spesifik menurun drastis menjadi 0 g.kg⁻¹, menandakan udara yang semakin kering. Pada bulan Januari–Februari terjadi penghangatan, sementara Maret–Mei mengalami pendinginan karena musim transisi. Perambatan gelombang MRG dipengaruhi oleh angin meridional, fluktuasi T' , dan gaya Coriolis pada lapisan tropopause.

5. DAFTAR PUSTAKA

Adam, O., Bischoff, T., & Schneider, T. (2016). Seasonal and interannual variations of the energy flux equator and ITCZ. Part II: Zonally varying shifts of the ITCZ. *Journal of Climate*, 29(20), 7281-7293.

- Bleizgys, R., Cesna, J., Kukharets, S., Medvedskiy, O., Strelkauskaitė-Buivydiene, I., & Knokneriene, I. (2023). Adiabatic Cooling System Working Process Investigation. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 767.
- Eden, C., Chouksey, M., & Olbers, D. (2018). Mixed Rossby–Gravity Wave–Wave Interactions. *Journal of Physical Oceanography*, 49, 291-308.
- Fathullah, N. Z., Lubis, S. W., & Setiawan, S. (2017). Characteristics of Kelvin waves and Mixed Rossby-Gravity waves in opposite QBO phases. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54.
- Heckbert, P. (1995). Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm. *Computer Graphics*, 2, 15-463.
- Hegerl, G. C., Bronnimann, S., Cowan, T., Friedman, A. R., Hawkins, E., Iles, C., . . . Undorf, S. (2019). Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14.
- Kiladis, G. N., Dias, J., & Gehne, M. (2016). The Relationship between Equatorial Mixed Rossby–Gravity and Eastward Inertio-Gravity Waves. Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(5), 2123–2145.
- Liu, W., Dong, S., Zheng, J., Liu, C., Wang, C., Shangguan, W., . . . Zhang, Y. (2022). Quantifying the Rainfall Cooling Effect: The Importance of Relative Humidity in Guangdong, South China. *Journal of Hydrometeorology*, 23(6), 875-889.
- Moore, F. C., Obradovich, N., Lehner, F., & Baylis, P. (2019). Rapidly declining remarkability of temperature anomalies may obscure public perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 4905-4910.
- Nagura, M., Masumoto, Y., & Horii, T. (2014). Meridional Heat Advection due to Mixed Rossby Gravity Waves in the Equatorial Indian Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 44(1), 343–358.
- Paldor, N., Fouxon, I., Shamir, O., & Garfinkel, C. I. (2018). The mixed Rossby–gravity wave on the spherical Earth. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 1820–1830.
- Poredos, P., Petelin, N., Vidrih, B., zel, T., Ma, Q., Wang, R., & Kitanovski, A. (2022). Condensation of water vapor from humid air inside vertical channels formed by flat plates. *Iscience*, 25(1).
- Sandro W. Lubis, & Respati, M. R. (2020). Impacts of Convectively Coupled Equatorial Waves on Rainfall Extremes in Java, Indonesia. *International Journal of Climatology*, 41.
- Selkirk, H. B., Schoeberl, M. R., Pfister, L., Thornberry, T. D., & Bui, T. V. (2017). Relative Humidity in the Tropopause Saturation Layer. *American Geophysical Union*.
- Stephan, C. C., Žagar, N., & Shepherd, T. G. (2021). Waves and coherent flows in the tropical atmosphere: New opportunities, old challenges. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(738), 2597-2624.
- Takasuka, D., & Satoh, M. (2020). Dynamical roles of mixed Rossby–gravity waves in driving convective initiation and propagation of the Madden–Julian oscillation: General views. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(22), 4211-4231.
- Takasuka, D., Satoh, M., & Yokoi, S. (2019). Observational Evidence of Mixed Rossby-Gravity Waves as a Driving Force for the MJO Convective Initiation and Propagation. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5546-5555.
- Turgut, E., & Usanmaz, O. (2016). An analysis of vertical profiles of wind and humidity based on long-term radiosonde data in Turkey. *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 17, 830 - 844.

