



Pemodelan Perambatan Gelombang Mixed Rossby-Gravity di Lapisan Stratosfer Bawah Menggunakan Algoritma Linier Gauss-Newton

Rizkia Putri Syafina^{1*}, Noersomadi², Dasep¹

¹Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

²Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

*Correspondence: E-mail: rizkiaputrisyafinaa@gmail.com

ABSTRAK

Proses transfer energi yang dibawa gelombang atmosfer ekuatorial berpotensi mempengaruhi isu perubahan iklim. Untuk mendeteksi perambatan gelombang dapat dilakukan analisis data vertikal atmosfer dari pengamatan balon radiosonde. Penelitian ini bertujuan menerapkan model algoritma linier Gauss-Newton terhadap variabel temperatur (T) dan komponen angin utara-selatan (v) di lapisan stratosfer bawah atau ketinggian 21 km di atas permukaan laut. Fluktuasi T dan v memunculkan masalah non-linier dalam pencarian parameter gelombang berupa amplitudo dan fasa. Kedua parameter tersebut dicari menggunakan metode inversi non-linier dengan pendekatan linier Gauss-Newton. Hasil penerapan model menunjukkan nilai yang berhimpit pada fluktuasi T dan v dengan rentang nilai $-4,5$ hingga $4,5$ K (dingin-hangat) dan -15 sampai 15 m/s (arah angin menuju selatan-utara). Untuk variabel T , terlihat adanya pergerakan menuju ke arah barat pada rentang waktu 13–24 April 2021, demikian pula pada variabel v terdeteksi pergerakan ke arah yang sama untuk rentang waktu 13–22 Mei 2021. Perambatan gelombang ke arah barat ini merepresentasikan penjalaran gelombang Mixed Rossby-Gravity.

© 2022 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

ABSTRACT

The energy transfer process transported by equatorial atmospheric waves has a potential effect on climate change issues. For detecting wave propagation, an analysis of the vertical atmospheric profile could be obtained from radiosonde balloon observations. This study aims to apply the Gauss-Newton linear algorithm model on the temperature (T) and the northward wind component (v) variables in the lower stratosphere, the layer around the altitude of 21 km above sea level. Fluctuations of T and v triggered a non-linear problem in determining the wave parameters, including amplitude and phase. These two parameters are examined using a non-linear inversion method with a linear Gauss-Newton approximation. The results showed that fluctuations in T and v of the model and observation data coincide with the value range -4.5 to 4.5 K (cold-warm) and -15 to 15 m/s (southward-northward wind). There is a movement in T fluctuations to the westward in the period of 13–24 April 2021. Likewise, a similar movement in v fluctuations was indicated during 13–22 May 2021. The westward propagation represented the propagation of the Mixed Rossby-gravity wave.

© 2022 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima 2 Oktober 2022

Direvisi 9 Oktober 2022

Disetujui 30 Oktober 2022

Tersedia Online 31 Oktober 2022

Dipublikasikan 1 Desember 2022

Kata Kunci:

Gelombang Atmosfer,
Komponen Angin Utara-Selatan,
Metode Linier Gauss-Newton,
Temperatur.

Keywords:

Atmospheric Waves,
Gauss-Newton Linear Method,
Northward Wind Component,
Temperature.

1. PENDAHULUAN

Isu perubahan iklim berdampak pada berbagai bidang, antara lain pada bidang pertanian dan transportasi. Setelah era industrialisasi, isu ini semakin terangkat karena berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* proses perubahan iklim berjalan semakin cepat dan dampak hal tersebut semakin dirasakan oleh setiap manusia di berbagai belahan dunia (Windyswara, 2018). Gejala yang ditunjukkan dari perubahan iklim antara lain adalah waktu pergeseran musim, kenaikan muka air laut, serta peningkatan suhu udara permukaan (Rahman, 2009). Windyswara (2018) mengungkapkan bahwa salah satu penyebab kejadian perubahan iklim adalah proses dinamika atmosfer global. Aktivitas ini berupa transfer energi yang dibawa oleh gelombang atmosfer ekuatorial (Nishimoto & Shiotani, 2013).

Gelombang atmosfer ekuatorial merupakan gelombang pada atmosfer yang berada di sekitar daerah ekuatorial dan dapat merambat secara horizontal ke timur dan barat serta secara vertikal ke utara dan selatan (Holton, 1973). Gelombang atmosfer ekuatorial di antaranya adalah gelombang Kelvin dan gelombang Mixed Rossby-Gravity. Gelombang kelvin memiliki ciri bergerak ke arah timur dan juga berperan memicu terjadinya fenomena Madden Julian Oscillation (MJO) serta Quasi Biennial Oscillation (QBO) (Kiladis et al., 2009). Adapun, gelombang Mixed Rossby-Gravity memiliki arah perambatan ke barat serta turut berperan terhadap QBO (Chen & Huang, 2009). Kedua gelombang tersebut sering berada pada lapisan troposfer dan stratosfer bawah (Kiladis et al., 2009).

Untuk mendeteksi perambatan gelombang atmosfer ekuatorial dapat dilakukan pengambilan data atmosfer dari suatu pengamatan. Salah satu pengamatan vertikal atmosfer adalah menggunakan sensor yang digantung pada balon radiosonde (Seidel et al., 2011). Instrumen ini dapat mengukur dari permukaan hingga ketinggian sekitar 30 km. Variabel atmosfer yang terukur di antaranya tekanan udara, temperatur, kelembapan, kecepatan, dan arah angin (Dirksen et al., 2014). Namun, pengamatan radiosonde memiliki keterbatasan dari sisi ketersediaan data sepanjang satu keliling sabuk ekuator bumi. Oleh karena itu, maka perlu dilakukan pemodelan untuk mengetahui gambaran dari pergerakan gelombang tersebut. Terdapat dua jenis pemodelan yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan ke belakang (*inverse modelling*). Pemodelan ke depan adalah simulasi metode numerik dengan pendekatan matematis, sedangkan pemodelan ke belakang merupakan simulasi dengan pendekatan matematis berdasarkan data pengamatan. (Lelievre & Oldenburg, 2006).

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang membahas mengenai pemodelan perambatan gelombang atmosfer ekuatorial. Andarini & Noersomadi (2020) mendeteksi pengaruh gelombang Kelvin pada fluktuasi uap air di lapisan tropopause. Dengan menerapkan metode Newtonian, mereka memperoleh model inversi yang menggambarkan gelombang tersebut. Hasil model menyatakan bahwa perambatan H_2O^* positif ke arah timur bersesuaian dengan angin zonal positif yang merupakan ciri dari gelombang Kelvin. Penelitian lainnya dilakukan oleh Lubis & Setiawan (2010) yaitu mengidentifikasi gelombang Kelvin di Indonesia berbasis data NCEP/NCAR Reanalysis I. Data dibagi menjadi empat periode dengan tujuan melihat variasi gelombang dalam empat musim. Kemudian dengan menggunakan transformasi Fourier diperoleh rata-rata aliran dasar angin serta periode gelombang kelvin tersebut.

Pada penelitian ini akan diestimasi sebuah model untuk gelombang atmosfer dari data radiosonde dengan berfokus pada nilai variabel temperatur dan komponen angin di

ketinggian 21 km. Temperatur sendiri berkaitan erat dengan proses pertukaran energi panas yang berlangsung di atmosfer (Fujiwara & Takahashi, 2001). Adapun komponen angin mendeskripsikan pergerakan massa udara di atmosfer (Kiladis et al., 2009). Analisis fluktuasi kedua variabel tersebut dapat menentukan ke mana arah gelombang menjalar. Berdasarkan hal analisis tersebut, selanjutnya dapat ditentukan jenis gelombang atmosfer yang diamati. Pada penelitian ini diterapkan metode inversi untuk menganalisis perambatan gelombang.

Sistematika penulisan pada makalah ini dimulai dengan abstrak mengenai penelitian yang dikaji. Selanjutnya pendahuluan menguraikan latar belakang penelitian ini. Sub-bahasan deskripsi model dan metode menjelaskan dasar penaksiran model yang dipilih dan penjabaran metode pendekatan linier Gauss-Newton. Hasil dan pembahasan menerangkan diagram alir untuk pencarian parameter model serta penjelasan interpretasi grafik dari algoritma yang telah dibuat. Bagian akhir makalah berisi ringkasan dan kesimpulan hasil penelitian.

2. METODE

2.1 Data

Data observasi merupakan hasil dari pengukuran lapangan yang dilakukan dalam kegiatan geofisika. Hasil pengukuran ini akan bergantung pada kondisi dan sifat fisis bawah permukaan (Broto & Afifah, 2008). Berdasarkan data pengamatan tersebut diharapkan dapat diperoleh informasi mengenai kondisi, sifat, ataupun posisi dari objek yang diamati. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil pengamatan radiosonde di beberapa titik pengamatan yang ditampilkan pada Tabel 1.

Dengan mengasumsikan bahwa gelombang atmosfer yang merambat di sekitar wilayah ekuator $\pm 15^\circ$ maka pemodelan inversi yang dilakukan tidak memperhatikan faktor titik koordinat *latitude*. Data dari stasiun Willis Island terletak pada lintang $-16,3^\circ$ tetap digunakan karena berdekatan dengan lintang -15° .

Tabel 1. Daftar Lokasi Stasiun Peluncuran Radiosonde Rutin di Sekitar Wilayah Indonesia dan Pasifik

No	Nama Stasiun	Longitude	Latitude	No	Nama Stasiun	Longitude	Latitude
1	Penang	100,26°	5,3°	12	Legaspi	123,73°	13,13°
2	Sepang	101,7°	2,71°	13	Davao Airport	125,65°	7,11°
3	Kota Bharu	102,28°	6,16°	14	Darwin	130,89°	-12,42°
4	Kuantan	103,21°	3,78°	15	Babeldaob	134,48°	7,34°
5	Pangkal Pinang	106,13°	-2,16°	16	Yap	138,08°	9,5°
6	Jakarta	106,65°	-6,11°	17	Guam Intl Arpt	144,79°	13,48°
7	Kuching	110,33°	1,48°	18	Willis Island	149,98°	-16,3°
8	Bintulu	113,03°	3,2°	19	Chuuk Lagoon	151,84°	7,46°
9	Kota Kinabalu	116,05°	5,93°	20	Pohnpei	158,21°	6,96°
10	Tawau	117,88°	4,26°	21	Majuro	171,29°	7,07°
11	Puerto Princessa	118,73°	9,75°				

2.2 Model

Pengetahuan mengenai proses fisis di atmosfer diperlukan untuk mengidentifikasi hubungan antara data dan persamaan model matematika. Pemodelan suatu permasalahan berdasarkan data observasi merupakan penyelesaian dari inversi yang umum terjadi pada geofisika (Nurwidyanto & Setiawan, 2011). Grandis, dalam bukunya yang berjudul “Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika” tahun 2009, mengungkapkan bahwa tujuan dari penaksiran sebuah model adalah tercapai keadaan cocok antara model dengan data observasi, oleh karena itu pemodelan ini dikenal juga dengan istilah *data fitting*.

Untuk menentukan model yang mendekati data observasi mengenai perambatan gelombang di lapisan stratosfer digunakan persamaan umum gelombang transversal yaitu $y = A \sin(\omega t \pm kx)$. Pada penelitian ini, data stasiun tersebar pada satu per-empat bagian dari keliling ekuator bumi. Oleh karena itu, untuk mencapai model yang mendekati data sebenarnya, perlu ditambahkan pengali 12 pada variabel *longitude* dan variabel fasa agar variasi gelombang semakin banyak. Dengan mengambil sebanyak 5 gelombang, maka model *fitting* yang diperoleh ditampilkan pada persamaan (1) berikut:

$$V_{\text{model}} = \sum_{k=1}^5 A_k \sin(k * 12(x + \theta_k)) \tag{1}$$

Notasi V_{model} menyatakan nilai model hasil *fitting* yang merupakan fungsi parameter A_k dan θ_k . Notasi A_k menunjukkan nilai amplitudo gelombang, sedangkan θ_k berarti nilai fasa. Nilai parameter tersebut akan dicari pada penelitian ini. Data variabel temperatur (T) dan komponen angin utara (v) pada rentang waktu 1 April 2021 00Z hingga 31 Mei 2021 12Z diambil sebagai data observasi yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai V_{model} dari persamaan (1). Pencarian nilai parameter di atas akan menggunakan metode inversi non-linier dengan pendekatan linier Gauss-Newton.

2.3 Metode Gauss-Newton

Prinsip penyelesaian permasalahan inversi non-linier dengan metode pendekatan linier Gauss-Newton sama dengan memperkirakan akar dari fungsi $y = f(x)$. Solusi yang dicari merupakan titik perpotongan dari garis singgung fungsi tersebut dengan sumbu-x ($f'(x) = 0$). Hasil perpotongan tersebut akan memunculkan titik baru sebagai estimasi dari akar solusi fungsi $f(x)$ dan titik ini dapat terus dicari secara iteratif. Menurut Grandis, dalam bukunya yang berjudul “Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika” tahun 2009, Grandis (2009), pencarian solusi permasalahan inversi non-linier dengan metode Gauss-Newton dapat menggunakan persamaan (2) berikut:

$$m_{n+1} = m_n - [J'_n \cdot J_n]^{-1} \cdot J'_n \cdot \Delta V \tag{2}$$

Notasi m adalah matriks parameter yang akan dicari. Dalam penelitian ini $m = [A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]$. Pencarian nilai m ditentukan melalui sejumlah iterasi yang disimbolkan dengan n , pada iterasi pertama (m_0) akan diinisialisasikan kondisi awal terlebih dahulu dengan mengambil sebarang nilai acak. Selanjutnya J merupakan matriks Jacobian dengan setiap elemennya adalah turunan parsial dari model *fitting*, J dapat dinyatakan sebagai matriks pada persamaan (3) berikut

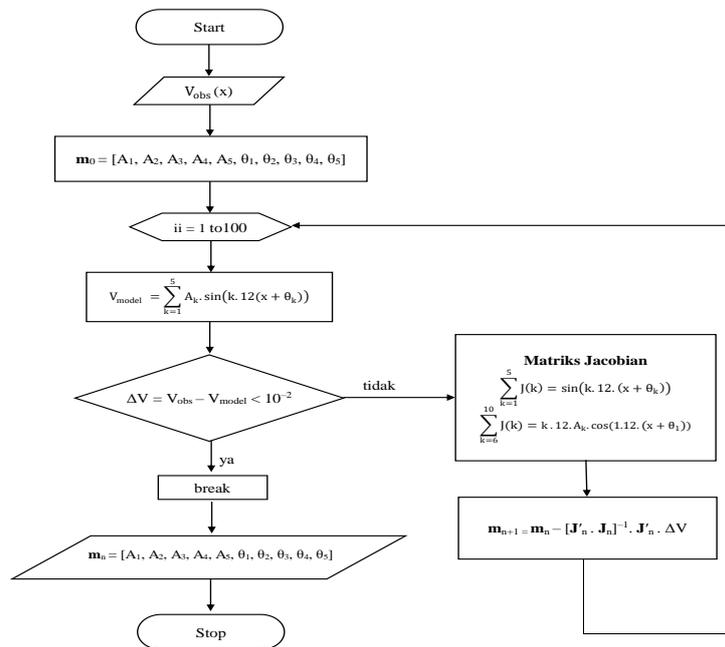
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{\text{model}}}{\partial A_1} & \frac{\partial V_{\text{model}}}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_{\text{model}}}{\partial A_5} & \frac{\partial V_{\text{model}}}{\partial \theta_5} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Simbol *prime* (') pada matriks J berarti transpose dari matriks tersebut. Nilai ΔV adalah selisih dari data observasi V_{obs} dan nilai hasil *fitting* V_{model} . Hasil selisih (galat) tersebut dijadikan sebagai indikator penghentian proses iterasi dalam menentukan parameter model. Ketika nilai ΔV semakin mendekati nol (10^{-2}) maka model *fitting* bisa dikatakan mendekati data observasi. Namun, jika nilai ΔV masih $>10^{-2}$, iterasi akan terus dilakukan hingga jumlah yang telah ditentukan.

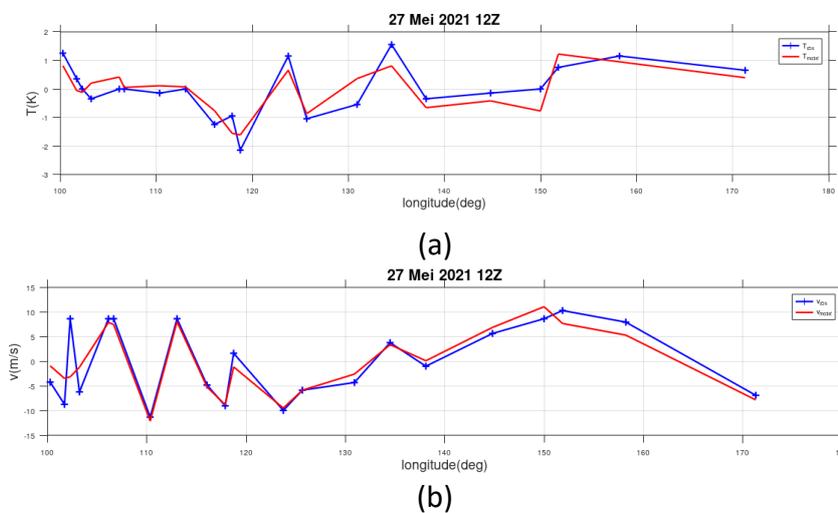
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan dalam mencari nilai parameter \mathbf{m} yang sesuai dengan model persamaan sebenarnya menggunakan pendekatan non linier Gauss Newton diawali dengan memasukkan data observasi (V_{obs}) ke dalam program, kemudian inialisasi nilai tebakan awal dari parameter \mathbf{m}_0 yang merupakan matriks berisi amplitudo ($A_1, A_2, A_3, A_4,$ dan A_5) serta fasa ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4,$ dan θ_5). Tahapan selanjutnya adalah melakukan iterasi sebanyak 100 kali dengan menerapkan nilai parameter \mathbf{m} pada persamaan V_{model} yang merujuk pada Persamaan (1). Kemudian mengidentifikasi nilai ΔV apakah sudah memenuhi syarat yaitu kurang dari 10^{-2} . Ketika nilai ΔV sudah memenuhi syarat maka iterasi dihentikan dan nilai parameter \mathbf{m} terakhir merupakan nilai yang sesuai dengan model. Namun, jika ΔV masih belum memenuhi syarat maka perlu melakukan modifikasi nilai parameter \mathbf{m} menggunakan matriks Jacobian (Persamaan (2)). Setelah diperoleh nilai parameter \mathbf{m} yang baru, maka iterasi akan berlanjut menggunakan nilai parameter baru tersebut hingga memenuhi syarat yang sudah ditentukan sebelumnya. Gambar 1 merupakan diagram alir untuk pencarian nilai parameter \mathbf{m} .

Gambar 2 menunjukkan perbandingan sampel individu antara data observasi dan nilai hasil model pada tanggal 27 Mei 2021 12Z untuk variabel T dan v . Nilai positif (negatif) T menunjukkan anomali hangat (dingin), sedangkan nilai positif (negatif) v berarti komponen angin menuju utara (selatan). Garis biru dan tanda bintang menampilkan data pengamatan, adapun garis merah mendeskripsikan nilai V_{model} . Pada Gambar 2 (a) terlihat bahwa hasil model menggambarkan penurunan T di sekitar 119° dan terdapat tiga puncak T positif di sekitar $124^\circ, 134^\circ,$ serta 152° . Fluktuasi dingin dan hangat yang ditunjukkan oleh model mendekati nilai observasi. Nilai fluktuasi temperatur ini bervariasi antara $-2,5$ hingga $2,5$ K. Pada gambar 2 (b) terlihat bahwa hasil model di antara 100° sampai 125° berfluktuasi cepat, terjadi perubahan arah angin menuju utara dan ke selatan secara bergantian. Di antara 140° – 160° angin didominasi menuju utara. Nilai komponen angin utara ini bervariasi pada interval $-10,5$ hingga $10,5$ m/s. Secara umum, nilai V_{model} menunjukkan fit yang baik terhadap V_{obs} .

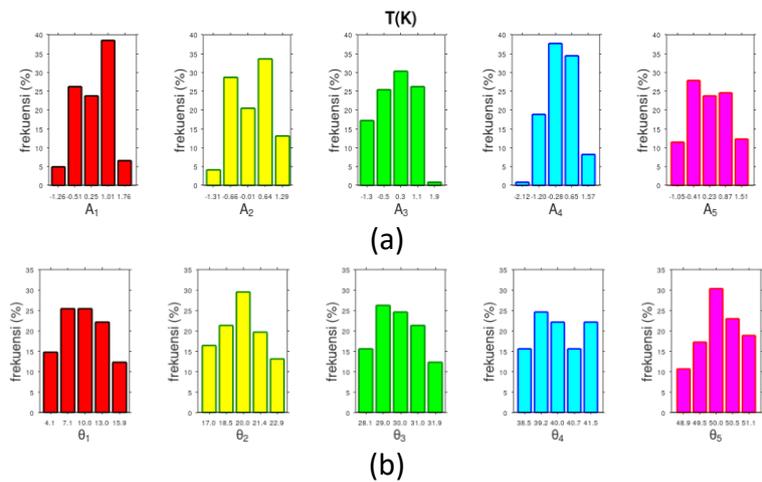


Gambar 1. Diagram alir metode inversi dengan pendekatan linier Gauss-Newton.



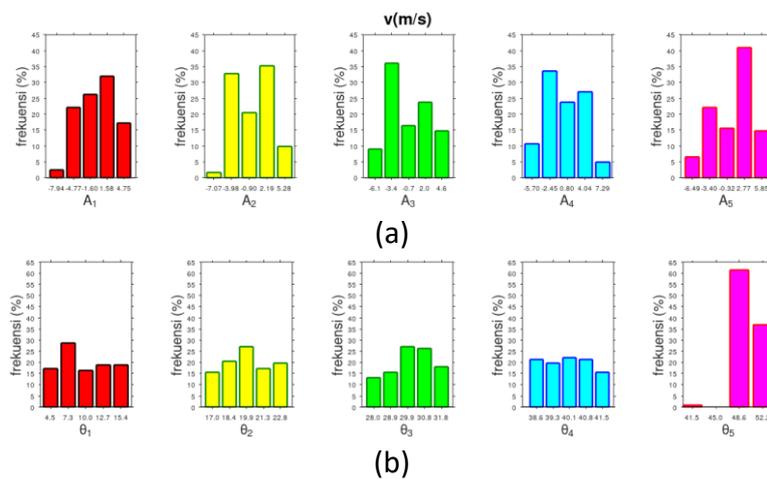
Gambar 2. Grafik sampel individu fluktuasi pada tanggal 27 Mei 2021 12Z (garis biru dan tanda silang) dan nilai hasil *fitting* model (garis merah). (a) variabel T, (b) variabel v.

Distribusi parameter model untuk variabel T ditampilkan dalam diagram batang (Gambar 3). Pada baris pertama (a) setiap kolom berturut-turut menyajikan A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , serta A_5 . Frekuensi parameter A_1 paling banyak dengan nilai tengah 1,01 sekitar 38%. Parameter A_2 memiliki frekuensi $\sim 33\%$ untuk nilai tengah $-0,66$. Untuk A_3 , A_4 , serta A_5 frekuensi tertinggi berturut-turut 30%, 37%, dan 27% yang berada pada interval dengan nilai tengah 0,3, $-0,28$, dan $-0,41$. Baris kedua (b) di setiap kolom pada gambar 3 menunjukkan parameter model θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , serta θ_5 . Untuk θ_1 nilai tengah $7,1^\circ$ dan 10° memiliki frekuensi sama yaitu 25%. Parameter θ_2 memiliki frekuensi tertinggi sebesar 30% pada nilai tengah 20° . Parameter θ_3 dan θ_4 memiliki frekuensi yang sama yaitu 25% dengan nilai tengah berturut-turut 29° dan $39,2^\circ$. Adapun θ_5 frekuensi terbanyak sebesar 30% dengan nilai tengah 50° . Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa parameter amplitudo yang bervariasi positif (negatif) menunjukkan fluktuasi temperatur hangat (dingin).



Gambar 3. (a) Diagram batang kumpulan seluruh hasil amplitudo untuk variabel T, (b) Diagram batang kumpulan seluruh hasil fasa untuk variabel yang sama.

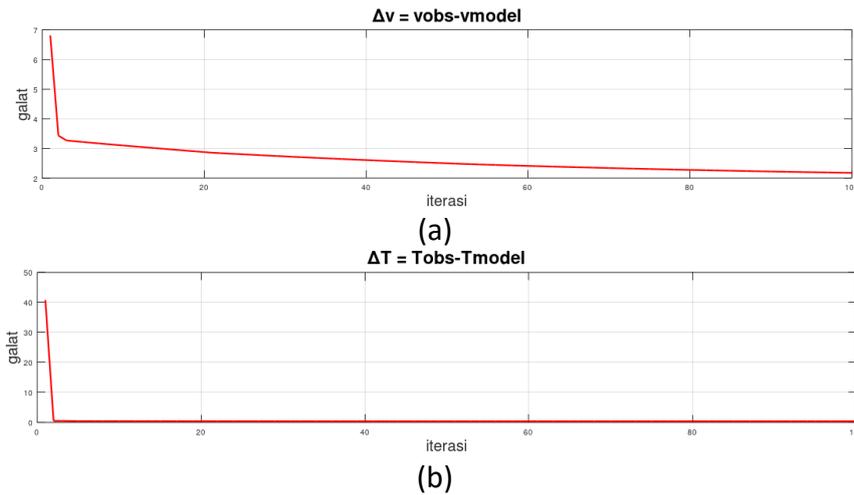
Diagram batang pada Gambar 4 memperlihatkan distribusi parameter model untuk variabel v dengan posisi yang sama dengan T. Untuk (a), parameter A_1 memiliki frekuensi terbesar yaitu 35% dengan nilai tengah 1,58. Sedangkan frekuensi tertinggi A_2 dan A_3 sama sebesar 35% untuk nilai tengah masing-masing 2,19 dan $-3,4$. Pada A_4 nilai tengah $-2,45$ dengan frekuensi 33%. Serta A_5 dengan frekuensi terbanyak 40% nilai tengah 2,77. Adapun untuk (b), parameter θ_1 memiliki frekuensi 30% pada nilai tengah $7,3^\circ$. Untuk θ_2 dan θ_3 berturut-turut dengan nilai tengah $19,9^\circ$ dan $29,9^\circ$ frekuensinya sama yaitu 25%. Parameter θ_4 dengan frekuensi terbesar 22% untuk nilai tengah $40,1^\circ$. Serta frekuensi tertinggi parameter θ_5 sejumlah 60% dengan nilai tengah $48,6^\circ$. Berdasarkan deskripsi di atas dapat dikatakan bahwa parameter amplitudo yang bervariasi positif (negatif) berarti komponen angin bervariasi pula menuju utara (selatan).



Gambar 4. (a) Diagram batang kumpulan seluruh hasil amplitudo untuk variabel v. (b) Diagram batang kumpulan seluruh hasil fasa untuk variabel yang sama.

Penelitian ini menggunakan iterasi sebanyak 100 kali. Apabila nilai galat memenuhi syarat $<10^{-2}$, proses iterasi dihentikan. Gambar 5 (a) menyajikan nilai ΔT untuk tanggal observasi 27 Mei 2021 12Z. Saat iterasi pertama galat bernilai 40 dan setelah dilakukan iterasi selanjutnya hingga ke 100 kali, galat menurun dan cenderung konstan mendekati nol mulai pada iterasi ke-2 yang berarti selisih model dan data semakin kecil. Adapun galat untuk variabel v (gambar 5 (b)) pada tanggal dan jumlah iterasi yang sama, diawali dengan galat ~ 7 yang kemudian semakin kecil dan tetap pada nilai 2. Artinya, setelah iterasi ke-100 galat pada kedua variabel

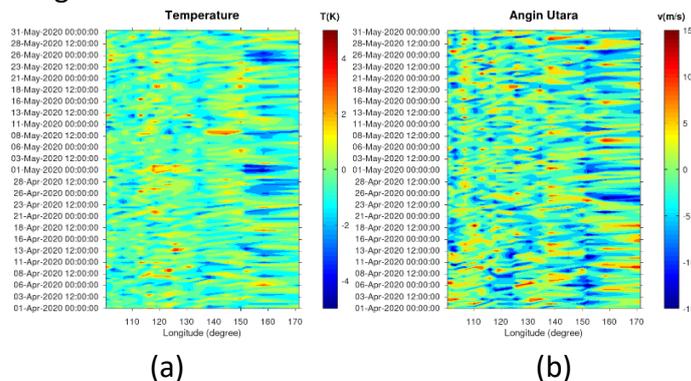
tersebut akan tetap konstan mendekati nilai terakhir. Parameter model A dan θ yang diambil untuk penentuan V_{model} adalah parameter pada iterasi terakhir.



Gambar 5. Grafik galat sampel individu di setiap iterasi pada 27 Mei 2021 12Z, (a) untuk variabel T, (b) untuk variabel v.

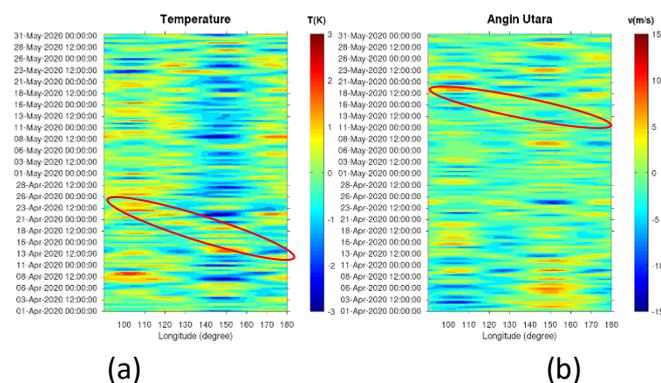
Nilai fluktuasi V_{model} di setiap stasiun selama waktu pengamatan 1 April 2021 00Z–31 Mei 2021 12Z ditampilkan dalam Gambar 6. Bagian (a) menggambarkan hasil model *fitting* untuk variabel T dengan nilai fluktuasi pada interval $-4,5$ hingga $4,5$ K. Terlihat bahwa pola amplitudo maksimum dan minimum temperatur menunjukkan perambatan ke arah kiri gambar (ke arah barat lokasi geografis). Perambatan ke arah barat ini merupakan ciri pergerakan gelombang Mixed Rossby-Gravity. Nilai T pada rentang -2 sampai 1 K terlihat lebih dominan. Di sekitar *longitude* 160° terlihat ekstrem dingin terjadi pada tanggal 1, 25, dan 26 Mei 2021.

Hasil model untuk variabel v pada Gambar 6 (b) menunjukkan fluktuasi angin utara dan selatan. Fluktuasi nilai model v berada di antara -15 hingga 15 m/s. Distribusi nilai v dalam rentang -5 sampai 5 m/s terlihat lebih merata. Selama periode akhir April terdeteksi adanya perambatan angin menuju ke arah barat lokasi geografis di sekitar *longitude* 150° – 170° . Dikarenakan angin bergerak ke arah barat, maka gelombang tersebut memenuhi ciri perambatan gelombang Mixed Rossby-Gravity. Berdasarkan variasi kedua variabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa temperatur dan komponen angin utara menunjukkan pola perambatan gelombang.



Gambar 6. Grafik kontur hasil model terhadap titik *longitude* stasiun pada tanggal 1 April 2021 00Z hingga 31 Mei 2021 12Z, (a) variabel T, (b) variabel v.

Gambar 7 memperlihatkan kontur fluktuasi nilai simulasi model untuk variabel T dan v berturut-turut pada (a) dan (b). Selama periode waktu yang sama, simulasi model hanya mengambil dua gelombang dengan amplitudo (fasa) adalah A_1 dan A_2 (θ_1 dan θ_2). Nilai T hasil simulasi model berfluktuasi di antara -3 sampai 3 K. Pada periode 13–24 April 2021 ditandai bentuk elips yang menunjukkan pola pergerakan nilai T sebesar $1-2$ K menuju ke arah barat. Sedangkan, di sekitar *longitude* $150^\circ-160^\circ$ nilai simulasi model dalam interval -3 hingga -1 K mendominasi pada periode 21 April–24 Mei 2021. Hasil simulasi model variabel v menunjukkan nilai fluktuasi yang sama dengan nilai model sebelumnya yaitu $(-15,15)$ m/s. Interval nilai $(-5,0)$ m/s terlihat mendominasi dibandingkan nilai lainnya. Namun, pola pergerakan angin menuju ke arah barat masih terlihat di periode 13–22 Mei 2021. Berdasarkan uraian sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan bahwa pada nilai simulasi model kedua variabel berfluktuasi dan menunjukkan pergerakan gelombang menuju arah barat sesuai dengan perambatan gelombang Mixed Rossby-Gravity.



Gambar 7. Grafik kontur hasil simulasi model terhadap titik *longitude* stasiun pada tanggal 1 April 2021 00Z hingga 31 Mei 2021 12Z, (a) dalam variabel T, (b) dalam variabel v.

4. KESIMPULAN

Dengan menggunakan pendekatan linier Gauss-Newton diperoleh bentuk model persamaan yang menggambarkan persebaran gelombang dari data observasi radiosonde. Berdasarkan kecocokan sampel harian dengan data observasi serta nilai galat yang mendekati nol, maka hasil pendekatan model dinilai fit dengan data pengamatan pada variabel temperatur (T) dan komponen angin (v). Terlihat pula fluktuasi nilai positif dan negatif pada rentang $-4,5$ hingga $4,5$ K untuk T dan -15 sampai 15 m/s untuk v. Hal tersebut menandakan adanya perubahan hangat dan dingin serta perubahan arah angin menuju utara dan selatan. Adapun nilai V_{model} untuk variabel T dalam rentang waktu 13–24 April 2021 terdeteksi adanya penjarangan menuju ke arah kiri (ke arah barat lokasi geografis) yang merupakan ciri dari pergerakan gelombang Mixed Rossby-Gravity. Demikian pula fluktuasi tersebut terlihat pada model variabel v dalam rentang waktu 13–22 Mei 2021. Berdasarkan uraian sebelumnya, maka persamaan model tersebut merepresentasikan sebaran gelombang Mixed Rossby-Gravity.

5. DAFTAR PUSTAKA

Andarini, D. F., & Noersomadi, N. (2020). Deteksi pengaruh gelombang Kelvin pada fluktuasi uap air di tropopause menggunakan model inversi. *Majalah Geografi Indonesia*, 34(1), 63-71.

- Broto, S., & Afifah, R. S. (2008). Pengolahan data geolistrik dengan metode schlumberger. *Teknik*, 29(2), 120-128.
- Chen, G., & Huang, R., (2009), Interannual variations in mixed Rossby–gravity waves and their impacts on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 22(3), 535-549.
- Dirksen, R. J., Sommer, M., Immler, F. J., Hurst, D. F., Kivi, R., & Vömel, H. (2014). Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12), 4463-4490.
- Fujiwara, M., & Takahashi, M. (2001). Role of the equatorial Kelvin wave in stratosphere-troposphere exchange in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19), 22763-22780.
- Holton, J. R. (1973). An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, 41(5), 752-754.
- Kiladis, G. N., Wheeler, M. C., Haertel, P. T., Straub, K. H., & Roundy, P. E., (2009), Convectively coupled equatorial waves. *Reviews of Geophysics*, 47(2), 1-42.
- Lelievre, P. G., & Oldenburg, D. W. (2006). Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility. *Geophysical Journal International*, 166(1), 76-90.
- Lubis, S. W., & Setiawan, S. (2010). Identifikasi gelombang Kelvin atmosfer ekuatorial di Indonesia berbasis data NCEP/NCAR reanalysis I. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, 10(2), 71-82.
- Nishimoto, E., & Shiotani, M. (2013). Intraseasonal variations in the tropical tropopause temperature revealed by cluster analysis of convective activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3545-3556.
- Nurwidyanto, I., & Setiawan, A. (2011). Inversi linier leastsquare dengan MATLAB (Studi kasus model gravitasi bola berlapis). *Berkala Fisika*, 14(3), 93-100.
- Rahman, H. A. (2009). Global climate change and its effects on human habitat and environment in Malaysia. *Malaysian Journal of Environmental Management*, 10(2), 17-32.
- Seidel, D. J., Sun, B., Pettey, M., & Reale, A. (2011). Global radiosonde balloon drift statistics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D07102), 1-8.
- Windyswara, D. (2018). Alasan pemerintah Indonesia meratifikasi Paris climate agreement tahun 2016. *Ejournal Ilmu Hubungan Internasional*, 6(4), 1419-1440.