



Aplikasi Algoritma *Simulated Annealing* untuk Pemodelan Fluktuasi Temperatur di Lapisan Tropopause

Dasep^{1*}, Noersomadi², dan Rizkia Putri Syafina³

^{1,3}Program 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: 1902192_dasep@upi.edu.

ABSTRAK

Kondisi atmosfer mempengaruhi berbagai sektor kegiatan manusia, sehingga studi tentang dinamika di lapisan atmosfer penting dilakukan terutama terkait dengan fluktuasi temperatur. Tujuan dari penelitian ini memodelkan fluktuasi temperatur di lapisan tropopause (ketinggian 17 km) dengan mencari nilai parameter amplitudo dan fasa gelombang yang mendekati data pengamatan. Metode pencarian parameter tersebut adalah inversi *simulated annealing*, yaitu simulasi pencarian solusi pada titik kritis global. Data penelitian ini adalah variabel temperatur di 17 km yang bersumber dari pengamatan satelit *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) Mission #2 GNSS radio occultation* selama periode April-Mei 2021. Hasil simulasi *annealing* menunjukkan parameter amplitudo dan fasa gelombang atmosfer di lapisan tropopause berturut-turut bervariasi pada rentang 3,4–23,86 K dan 7,3°–52,5°. Model simulasi menunjukkan perambatan temperatur dari arah barat ke timur dan berfluktuasi pada selang –25 sampai 25 K.

© 2023 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

ABSTRACT

Atmospheric conditions influence various sectors of human activity, so it is important to study the dynamics of the atmospheric layers, especially those related to temperature fluctuations. The aim of this research is to investigate the model of temperature fluctuations in the tropopause layer (at an altitude of 17 km) by determining the wave amplitude and phase parameters. The method for obtaining parameters is defined as simulated annealing inversion, which is a simulation of finding solutions at global critical points. The data used in this study are temperature at 17 km, which retrieved from the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) Mission #2 GNSS radio occultation satellite during April–May 2021. The results of the annealing simulation show that the amplitude and phase parameters of atmospheric waves in the tropopause layers vary between 3.4–23.86 K and 7.3–52.5°, respectively. The simulation model shows that the temperature spreads from west to east and fluctuates between –25 and 25 K.

© 2023 Kantor Jurnal dan Publikasi UPI

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima 4 November 2022

Direvisi 11 Desember 2022

Disetujui 21 Januari 2023

Tersedia online 1 Mei 2023

Dipublikasikan 1 Juni 2023

Kata Kunci:

Gelombang Atmosfer, Inversi Simulated Annealing, Lapisan Tropopause, Temperatur.

Keywords:

Atmospheric Waves, Simulated Annealing, Temperature, Tropopause Layer.

1. PENDAHULUAN

Kegiatan manusia di era sekarang sangat bergantung terhadap kondisi cuaca dan iklim, baik secara langsung maupun tidak langsung. Analisis cuaca dan iklim diperlukan manusia hampir di setiap sektor kegiatan mulai dari kegiatan wisata, kegiatan kebudayaan, sektor pertanian, dan lain-lain. Analisis cuaca dan iklim berkaitan erat dengan pengetahuan sains atmosfer. Oleh karena itu, pengetahuan tentang sains atmosfer sangat diperlukan untuk menunjang kehidupan di bumi.

Berdasarkan karakteristik temperatur, atmosfer terbagi menjadi empat lapisan utama yaitu lapisan troposfer, lapisan stratosfer, lapisan mesosfer dan yang terakhir lapisan termosfer (Holton, 1973). Di antara lapisan troposfer dan lapisan stratosfer, terdapat lapisan pembatas yang disebut dengan lapisan tropopause. Di wilayah tropis, lapisan ini disebut dengan *Tropical Tropopause Layer* (TTL) atau lapisan tropopause tropis (Fueglistaler, et al., 2009; Hasebe, et al., 2018). TTL merupakan lapisan yang menjadi tempat pertukaran gas di troposfer dan stratosfer serta tempat penjalaran gelombang Kelvin ekuatorial (Randel & Wu, 2005; Kim & Son, 2012; Scherllin-Pirscher, et al., 2017; Andarini & Noersomadi, 2020). Dengan demikian, studi penjalaran gelombang Kelvin penting dilakukan.

Penelitian ini fokus pada pemodelan gelombang Kelvin di ketinggian 17 km menggunakan data pengamatan satelit. *Global Navigation Satellite System* (GNSS) *radio occultation* merupakan sistem satelit yang berfungsi untuk pengamatan variabel atmosfer secara vertikal (Bock, et al., 2004). Data utama dalam penelitian ini adalah temperatur. Teknik pengamatan ini mencakup wilayah global. Dengan demikian, hasil pengamatan teknik satelit ini dapat dimanfaatkan untuk analisis penjalaran gelombang skala planet bumi.

Untuk menyelesaikan masalah penjalaran gelombang Kelvin ini, penulis menggunakan algoritma *simulated annealing*. Karena data observasi yang diperoleh cukup besar, maka ruang solusi cukup besar pula. Oleh karena itu, algoritma *simulated annealing* menjadi salah satu metode yang digunakan untuk mencari solusi yang optimal. Penelitian tentang pengaruh gelombang Kelvin pada fluktuasi uap air di tropopause telah dilakukan oleh Andarini dan Noersomadi (2020). Pada penelitian ini digunakan metode yang berbeda. Adapun penelitian yang menggunakan algoritma *simulated annealing* di antaranya dilakukan oleh Halim, et al., (2020) yang menguji lokasi hiposenter mikro-*earthquake*.

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 algoritma *simulated annealing*. 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 Algoritma Inversi *Simulated Annealing*

Metode inversi merupakan suatu proses pengolahan data observasi yang menggunakan teknik penyelesaian masalah secara matematika dan statistik untuk mendapatkan hasil berupa informasi yang dapat digunakan untuk menganalisis proses distribusi sifat fisis bawah permukaan. Tujuan dari metode inversi adalah mencari nilai minimum fungsi untuk mendekati model pengamatan, yakni mencari nilai minimum global dari suatu fungsi objektif.

Pada metode pencarian minimum global, untuk memperkirakan pola fungsi objektif adalah dengan cara memilih sampel model secara acak pada ruang model. Setiap model pada ruang model memiliki peluang yang sama sebagai sampel model. Metode pengambilan bilangan acak secara seragam dengan membangkitkan bilangan antara 0 dan 1 sering disebut dengan metode *Monte-Carlo*.

Ketika terdapat problem optimisasi kombinatorial, yaitu permasalahan yang memiliki ruang solusi terlalu besar sehingga sulit ditemukan solusi eksak, maka diperlukan metode inversi yang bersifat umum. Salah satu metode inversi umum adalah *simulated annealing* (SA). SA merupakan salah satu teknik pencarian acak yang cukup fleksibel dan telah berhasil diterapkan untuk menemukan solusi optimal atau mendekati optimal (Panggabean, 2004). Algoritma SA beranalogi dengan proses pendinginan (*annealing*) yang diterapkan dalam pembuatan material yang terdiri dari butir kristal (Panggabean, 2004).

Faktor kendali temperatur (KT) dapat mempengaruhi permulaan ronde *annealing*. Pemilihan nilai KT yang tinggi dapat membuahkan solusi sementara secara bebas. Nilai fungsi objektif akan mengevaluasi tingkat kebebasan solusi sementara melalui pemeriksaan seberapa optimal solusi tersebut terhadap model. Jika selisih antara observasi dan fungsi objektif mengecil maka nilai parameter dari fungsi objektif dipilih menjadi solusi terbaru. Akan tetapi apabila faktor kendali masih tinggi, maka dilakukan pengulangan proses dengan menurunkan faktor kendali hingga diperoleh nilai fungsi objektif yang semakin kecil.

Sebelum melakukan proses *annealing*, untuk mencari nilai parameter model yang minimum maka parameter awal model harus diberikan terlebih dahulu sebagai inisialisasi solusi awal. Selanjutnya, untuk menentukan nilai parameter model adalah dengan memilih sembarang bilangan di dalam interval antara nilai minimum dan maksimum model dari data observasi (Akbar, *et al.*, 2013). Pemilihan bilangan sembarang ini dapat dilakukan dengan cara mengambil bilangan acak R antara 0 dan 1 dan memetakannya ke dalam Persamaan (1)-(2).

$$\text{model}_1 = \text{model}_{\min} + R(\text{model}_{\max} - \text{model}_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{model}_2 = \text{model}_{\max} - R(\text{model}_{\max} - \text{model}_{\min}) \quad (2)$$

Untuk mencari nilai probabilitas model digunakan Persamaan (3):

$$P(dT) = \exp\left(-\frac{dT}{KT}\right) \quad (3)$$

di mana dT menyatakan perubahan fungsi objektif dengan observasi. Jika $dT \leq 0$ maka perubahan model diterima. Sebaliknya, jika $dT > 0$ maka untuk menentukan penerimaan model menggunakan bilangan acak R. Apabila $P(dT) > R$ maka perubahan model diterima. Adapun jika $P(dT) \leq R$ maka perubahan model ditolak dan kembali menggunakan model sebelumnya.

Tahapan selanjutnya pada saat menerima model, parameter kendali KT juga menjadi faktor yang mempengaruhi model seperti yang sudah disebutkan di atas, yaitu harus menurunkan KT dengan suatu konstanta. Skema penurunan KT menggunakan Persamaan (4):

$$KT_{n+1} = \alpha KT_n \quad (4)$$

dengan KT_n merupakan faktor kendali ke-n dan α adalah konstanta penurunannya. Penurunan parameter kendali ini tidak boleh terlalu cepat ataupun terlalu lambat. Penurunan yang terlalu cepat akan menyebabkan proses terjebak pada minimum lokal, sedangkan penurunan yang terlalu lambat akan membutuhkan waktu yang lama menuju nilai minimum. Selain mempengaruhi waktu pengolahan, parameter KT juga sangat mempengaruhi hasil akhir model. Oleh karena itu, proses pemilihan bilangan real positif α menjadi penentu dalam mencari solusi model yang minimum.

2.2 Deskripsi Model

Dalam artikel ini, untuk memodelkan fluktuasi temperatur pada lapisan tropopause digunakan pendekatan persamaan gelombang Kelvin ekuatorial. Di daerah ekuatorial, gelombang Kelvin memiliki amplitudo terbesar dengan bilangan gelombang zonal utama 1 dan 2 (Tsai, et al., 2004). Berdasarkan Tsai, et al., (2004), model persamaan pendekatan tersebut dinyatakan dalam Persamaan (5):

$$T_{\text{model}} = A_1 * \sin(x - \theta_1) + A_2 * \sin 2 * (x - \theta_2) \quad (5)$$

di mana T_{model} merupakan temperatur hasil model dengan parameter A_1 , A_2 merupakan amplitudo model dan θ_1 , θ_2 merupakan perubahan fasa pada model, serta x adalah titik koordinat arah angin timur-barat pada data pengamatan. Untuk mencari nilai T_{model} , penulis menggunakan metode inversi *simulated annealing* seperti penjelasan sebelumnya. Lebih jauh lagi, pendekatan nilai-nilai parameter A_1 , A_2 dan θ_1 , θ_2 ditentukan dengan menggunakan formulasi model seperti pada persamaan (1) dan (2).

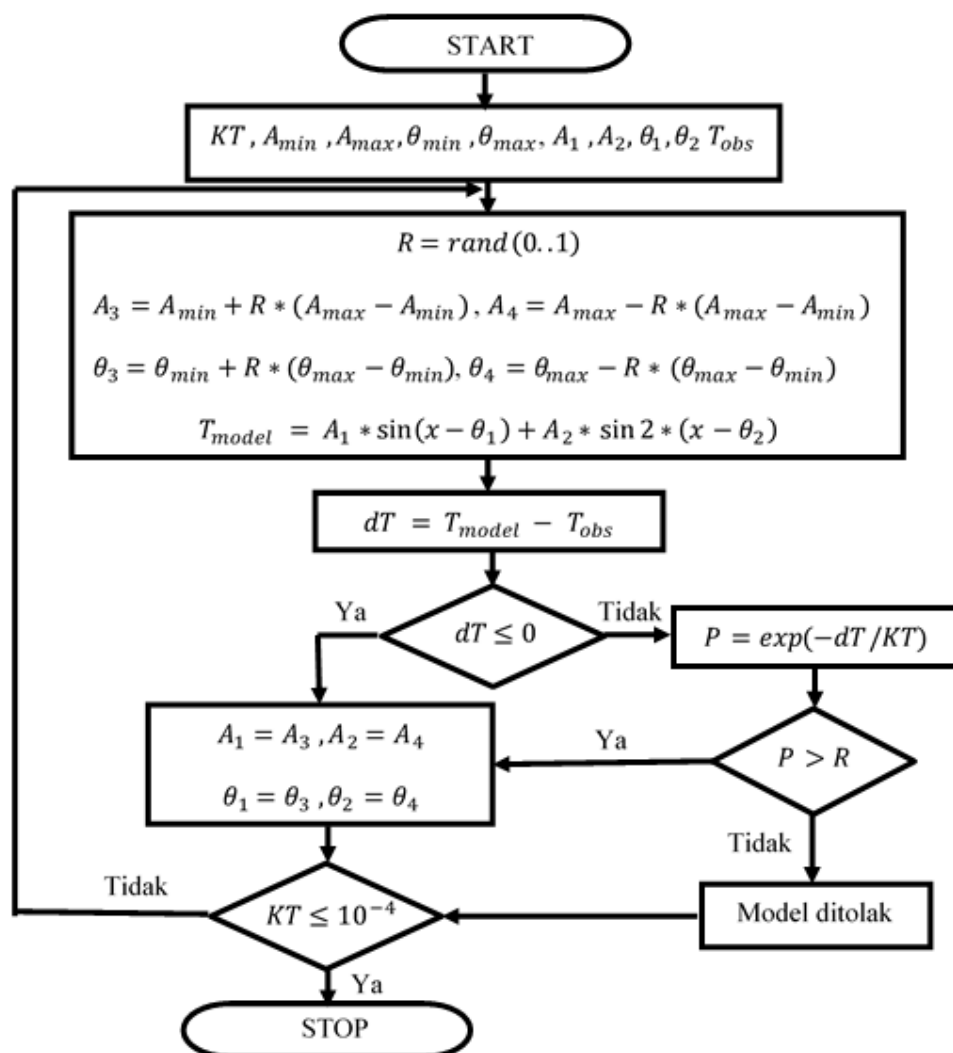
2.3 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil pengamatan satelit *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) mission #2 GNSS radio occultation* (Weiss, et al., 2022). Data ini merupakan level 2 yang terdiri atas variabel tekanan udara, temperatur, dan kelembapan. Profil atmosfer hasil pengamatan *GNSS radio occultation* mendekati hasil pengamatan sensor balon radiosonde (Anthes, 2011). Data yang digunakan adalah data pengamatan selama bulan April-Mei 2021 pada ketinggian 17 km di atas permukaan bumi. Total jumlah data adalah 243, di mana setiap harinya pada rentang April-Mei 2021 terbagi menjadi empat waktu yaitu 03.00, 09.00, 15.00 dan 21.00, kecuali pada tanggal 20 April 2021 yang hanya terdapat tiga waktu pengamatan 03.00, 09.00 dan 15.00.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memperoleh hasil model fluktuasi temperatur dengan menggunakan persamaan (5), maka perlu dicari nilai setiap parameter A_1 , A_2 , θ_1 , dan θ_2 yang terbaik, sehingga hasil model mendekati model observasi. Nilai-nilai parameter tersebut akan dicari dengan menggunakan algoritma *simulated annealing*. Oleh karena itu, diperlukan tahapan-tahapan yang harus dilakukan untuk mendapat nilai parameter yang terbaik. Tahapan-tahapan tersebut diilustrasikan pada diagram alir yang terdapat pada Gambar 1.

3.1. Diagram Alir Algoritma *Simulated Annealing* Pemodelan Fluktuasi Temperatur di Lapisan Tropopause



Gambar 1. Diagram Alir Model Dengan Iterasi Maksimum 100.

Berdasarkan Gambar 1, berikut ini akan dijelaskan tahapan-tahapan yang perlu dilakukan untuk memperoleh nilai parameter A_1 , A_2 , θ_1 , dan θ_2 , yaitu:

- 1) Tahap pertama definisikan terlebih dahulu inialisasi parameter kendali KT , nilai minimum dan maksimum amplitudo dan fasa dari data observasi (A_{min} , A_{max} , θ_{min} , θ_{max}), serta berikan solusi awal model yaitu nilai A_1 , A_2 , θ_1 , dan θ_2 . Dalam artikel ini, penulis memberikan nilai untuk setiap inialisasi tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 KT &= 60 \\
 A_{min} &= 0, A_{max} = 22 \\
 \theta_{min} &= 0, \theta_{max} = 60 \\
 A_1 &= 0, A_2 = 22 \\
 \theta_1 &= 0, \theta_2 = 60
 \end{aligned}$$

- 2) Selanjutnya masuk ke tahap kedua yaitu tahap *looping* dengan banyak iterasi maksimum adalah 100 iterasi. Proses di dalam *looping* ini adalah menghitung bilangan acak R antara 0 dan 1, menghitung solusi baru A_3 , A_4 , θ_3 , dan θ_4 serta menghitung fungsi objektif model dengan formulasi sebagai berikut:

$$T_{model} = A_1 * \sin(x - \theta_1) + A_2 * \sin 2 * (x - \theta_2)$$

dengan x adalah titik koordinat angin timur-barat (*longitude*) dari data pengamatan.

- 3) Tahapan ketiga yaitu mengevaluasi selisih antara nilai fungsi objektif dan data observasi model (T_{obs}), dengan formulasi:

$$dT = T_{model} - T_{obs}$$

Jika $dT \leq 0$ maka solusi baru A_3, A_4, θ_3 , dan θ_4 diterima, jika tidak maka lakukan pengujian probabilitas model yaitu menghitung nilai dari $P = \exp(-dT/KT)$ dan lakukan pengujian terhadap nilai acak R . Jika $P > R$ maka solusi baru diterima, jika tidak maka solusi lama lebih baik sehingga solusi baru ditolak.

Jika solusi baru diterima maka *update* solusi sementara menjadi:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_3, A_2 = A_4 \\ \theta_1 &= \theta_3, \theta_2 = \theta_4 \end{aligned}$$

dan lakukan penurunan terhadap faktor kendali untuk mencari solusi berikutnya, dengan formula:

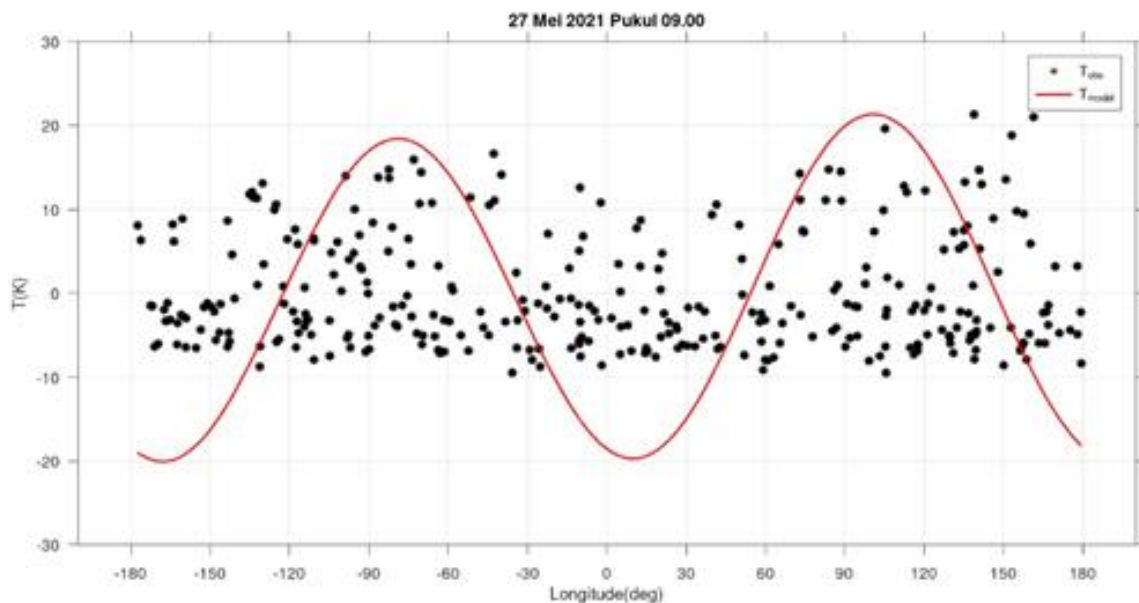
$$KT = 0.5 * KT$$

yang berarti nilai kendali terbaru menjadi setengah dari nilai kendali sebelumnya.

- 4) Tahapan keempat yaitu uji parameter kendali. Jika $KT \leq 10^{-4}$ maka proses *looping* berhenti, sehingga solusi terbaiknya adalah nilai A_1, A_2, θ_1 , dan θ_2 yang terakhir. Sebaliknya jika $KT > 10^{-4}$ maka kembali ke tahap 2, dan lakukan terus iterasi sampai pengujian tahap keempat terpenuhi atau sampai iterasi maksimum tercapai yaitu 100 iterasi.

3.2 Sampel Individu

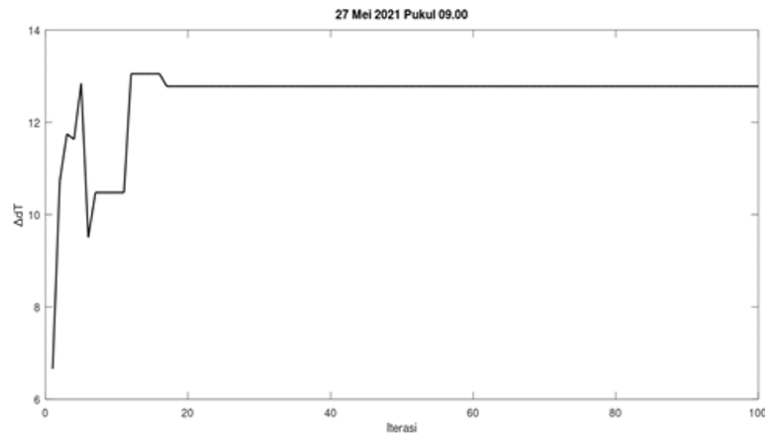
Grafik model pada Gambar 2 merupakan sampel individu antara T_{model} yaitu temperatur yang diperoleh dari hasil proses algoritma *annealing* dan T_{obs} yaitu temperatur hasil pengamatan yang diambil pada data satelit tanggal 27 Mei 2021 tepatnya pada pukul 09.00 dengan radius satu putaran bumi. Sebaran bintang-bintang (*) menunjukkan sebaran temperatur data pengamatan (T_{obs}), sebaran tersebut berada pada interval -10 sampai 20 K, walaupun ada beberapa titik yang lebih dari 20 K. Selanjutnya garis merah pada Gambar 2 merupakan hasil pendekatan model (T_{model}) dengan algoritma *simulated annealing*. Model ini mencapai titik minimum sebesar -20.083 K dan mencapai titik maksimum sebesar 21.364 K.



Gambar 2. Grafik Sampel Individu

3.3 Perubahan Fungsi Objektif Model

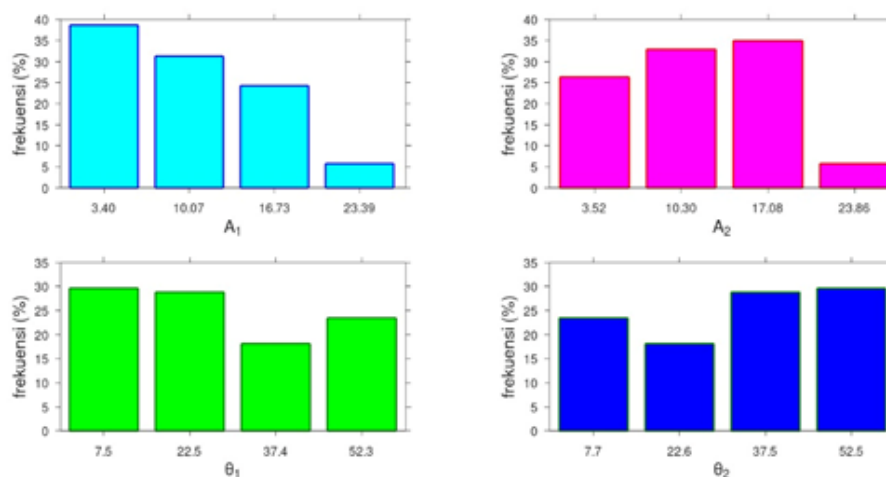
Gambar 3 menunjukkan nilai evaluasi selisih antara fungsi objektif model dan data observasi yang diambil dari data pengamatan pada tanggal 27 Mei 2021 tepatnya pada pukul 09.00. Terlihat bahwa dari iterasi awal nilai evaluasi mengalami perubahan yang drastis naik dan terus mengalami perubahan. Sampai pada iterasi ke-17 nilai evaluasi mencapai nilai yang mulai stabil atau konstan hingga iterasi ke-100, artinya pada kasus data observasi ini untuk mendapatkan solusi pendekatan terbaik hanya memerlukan 17 iterasi.



Gambar 3. Grafik Perubahan Fungsi Obyektif (*Error*)

3.4 Histogram Amplitudo dan Perubahan Fasa

Gambar 4 menunjukkan histogram dari nilai amplitudo A_1 , A_2 dan nilai fasa θ_1 , θ_2 yang merupakan hasil dari proses *annealing* untuk setiap sampel data temperatur yang diambil selama bulan April sampai bulai Mei tahun 2021. Panel atas menunjukkan histogram data pendekatan amplitudo A_1 , A_2 dari hasil pendekatan model persamaan (5). Dari 243 data, sebaran A_1 terlihat pada histogram sebelah kiri, di mana pada nilai tengah 3,40 K persentasenya mencapai 38,68%, pada nilai tengah 10,07 K sebarannya sebanyak 31,28%. Sedangkan untuk nilai tengah 16,73 K dan 23,39 K persentase sebaran A_1 mencapai 24,28% dan 5,76%. Selanjutnya untuk sebaran data A_2 terlihat pada histogram sebelah kanan. Nilai A_2 , paling banyak tersebar pada nilai tengah 17,08 K yaitu mencapai 34,98%, dan paling sedikit tersebar pada nilai tengah 23,86 K sebanyak 5,76%. Sisanya tersebar pada nilai tengah 3,52 K dan 10,3 K yang masing-masing sebanyak 26,33% dan 32,92% dari total banyaknya A_2 .

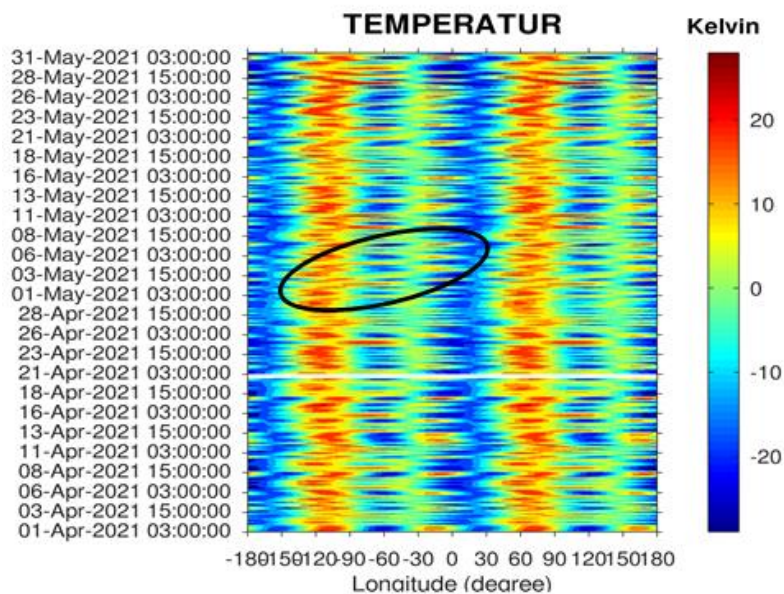


Gambar 4. Histogram Amplitudo (A) dalam Kelvin dan Fasa (θ) dalam Derajat

Panel bawah menunjukkan histogram penyebaran nilai fasa θ_1 , θ_2 . Untuk nilai θ_1 dan θ_2 pola penyebaran nilainya berada pada selang interval yang sama, dan frekuensi sebaran terbesar keduanya sama-sama mencapai angka 29,63% yaitu pada sebaran data dengan nilai tengah masing-masing $7,2^\circ$ dan $52,5^\circ$. Begitu pula untuk frekuensi terendah sama-sama mencapai 18,12% di mana untuk θ_1 tersebar pada nilai tengah $37,4^\circ$ dan untuk θ_2 tersebar pada data nilai tengah $22,6^\circ$.

3.5 Kontur Temperatur

Gambar 5 merupakan kontur yang merepresentasikan fluktuasi temperatur hasil model *simulated annealing* selama rentang bulan April sampai Mei 2021 pada ketinggian 17 km di atas permukaan bumi. Terlihat pada gambar, bahwa hasil T_{model} (temperatur) berfluktuasi pada rentang interval -25 sampai 25 K. Pada kontur dapat dilihat bahwa sebaran temperatur di bawah -10 K lebih dominan di titik koordinat -180° sampai -150° dan titik koordinat 0° sampai 30° . Artinya, pada daerah ini temperatur lebih dingin sepanjang bulan April dan Mei. Sedangkan pada selang titik koordinat -150° sampai -90° sebaran fluktuasi temperatur di atas 10 K terlihat lebih dominan, sehingga pada daerah ini temperatur lebih hangat dibandingkan dengan daerah lain. Demikian pula untuk daerah pada selang titik koordinat 50° sampai 90° .



Gambar 5. Kontur Temperature selama April – Mei 2021. Garis Elips Hitam Menunjukkan Perambatan Puncak Gelombang Menuju ke Timur

Pada Gambar 5, fluktuasi temperatur juga memperlihatkan bahwa perambatan gelombang bergerak dari arah barat ke timur atau dari arah kiri ke kanan pada gambar. Perhatikan perambatan temperatur pada tanggal 1 Mei pukul 03.00 sampai tanggal 6 Mei pukul 03.00, tepatnya di titik koordinat -150° sampai 0° . Terlihat bahwa temperatur merambat ke arah timur yang berfluktuasi dari -25 sampai ke 0 K. Artinya pada rentang waktu ini di titik koordinat -150° sampai 0° temperatur berubah dari hangat sampai dingin. Terlihat pula di titik koordinat -30° sampai 0° temperatur kembali hangat. Begitu pula untuk waktu dan titik koordinat lainnya, bahwa temperatur hasil model merambat ke arah timur.

4. KESIMPULAN

Pendekatan model observasi dengan algoritma *simulated annealing* dapat diperoleh hasil dengan cepat ketika pemilihan solusi awal (inisialisasi) yang tidak terlalu jauh atau terlalu dekat dengan solusi eksak. Berdasarkan data temperatur yang diambil dari hasil pengamatan COSMIC mission #2 GNSS radio occultation selama rentang bulan April-Mei 2021, dengan algoritma *simulated annealing* secara umum dapat diperoleh hasil model temperatur dengan iterasi yang kurang dari 100 untuk setiap data pengamatan. Sebagai contoh, pada data pengamatan tanggal 27 Mei 2021 pukul 09.00 hanya memerlukan 17 iterasi untuk mendapatkan parameter model temperatur yang terbaik. Kemudian hasil simulasi *annealing* ini memberikan nilai parameter amplitudo A_1 , A_2 dan nilai parameter fasa θ_1 , θ_2 yang cukup bervariasi. A_1 , A_2 berturut-turut memiliki rentang 3,4–23,39 K dan 3,52–23,86 K. Adapun θ_1 , θ_2 memiliki rentang yang sama yaitu $7,3^\circ$ – $52,5^\circ$. Hal ini disebabkan nilai acak R yang dipetakan pada saat menentukan solusi baru. Namun solusi baru ini selalu berada pada interval batas minimum dan maksimum parameter model yang dicari. Sehingga semakin lama solusi baru ini akan mendekati solusi eksak. Dari kontur hasil model, temperatur berfluktuasi pada rentang interval -25 sampai 25 K di seluruh titik koordinat bumi. Fluktuasi temperatur di lapisan tropopause menunjukkan perambatan gelombang dari arah barat ke timur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. F., Nugraha, A. D., Sule, M. R., & Juanda, A. A. (2012). Penentuan hiposenter menggunakan simulated annealing dan guided error serta penentuan model kecepatan gelombang seismik 1-D pada lapangan "Geothermal". *Jurnal Geofisika*, 13(1), 16-22.
- 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.
- Anthes, R. A. (2011). Exploring earth's atmosphere with radio occultation: Contributions to weather, climate and space weather. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), 1077-1103.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., & Melbourne, T. I. (2004). Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network. *Geophysical Research Letters*, 31(6), 1-4.
- Fueglistaler, S., Dessler, A. E., Dunkerton, T. J., Folkins, I., Fu, Q., & Mote, P. W. (2009). Tropical tropopause layer. *Reviews of Geophysics*, 47(1), 1-31.
- Halim, G. R., Utama, W., & Mariyanto, M. (2020). Uji lokasi hiposenter Mikro-Earthquake (MEQ) dengan metode inversi simulated annealing pada lapangan panas bumi "XX". *Jurnal Geosaintek*, 6(2), 71-76.
- Hasebe, F., Aoki, S., Morimoto, S., Inai, Y., Nakazawa, T., Sugawara, S., ... & Sugidachi, T. (2018). Coordinated upper-troposphere-to-stratosphere balloon experiment in Biak. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(6), 1213-1230.
- Holton, J. R. (1973). An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, 41(5), 752-754.

- Kim, J., & Son, S. W. (2012). Tropical cold-point tropopause: Climatology, seasonal cycle, and intraseasonal variability derived from COSMIC GPS radio occultation measurements. *Journal of Climate*, 25(15), 5343-5360.
- Panggabean, H. P. (2004). Algoritma simulated annealing untuk pembentukan sel mesin dengan dua tipe fungsi objektif dan dua cara pembatasan sel. *Jurnal Teknik Industri*, 6(1), 10-24.
- Randel, W. J., & Wu, F. (2005). Kelvin wave variability near the equatorial tropopause observed in GPS radio occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D3), 1-13.
- Scherllin-Pirscher, B., Randel, W. J., & Kim, J. (2017). Tropical temperature variability and Kelvin-wave activity in the UTLS from GPS RO measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 793-806.
- Tsai, H. F., Tsuda, T., Hajj, G. A., Wickert, J., & Aoyama, Y. (2004). Equatorial Kelvin waves observed with GPS occultation measurements (CHAMP and SAC-C). *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1B), 397-406.
- Weiss, J. P., Schreiner, W. S., Braun, J. J., Xia-Serafino, W., & Huang, C. Y. (2022). COSMIC-2 mission summary at three years in orbit. *Atmosphere*, 13(9), 1409.