

VARIABILITAS PROFIL SUHU VERTIKAL DAN KETERKAITAN DENGAN EFEK RUMAH KACA DI INDONESIA

Indah Susanti, Waluyo Eko Cahyono, dan Rosida

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer – LAPAN Bandung

indah.susanti@lapan.go.id

ABSTRACT

Temperature variations profile have analyzed using data Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) from January 2003 - December 2015 for 24 altitude. By using a regression equation to temperature in all altitude of atmosphere by time, showed a warming atmosphere at 70 mb - 30 mb. Meanwhile, at others shows cooling. In this case, the energy balance determined the rate of temperature changes. La Niña occurred in 2010, causing an abundance of moisture, and when the rains fall contributed to temperatures increased and caused 3 °C of temperature anomaly. In addition, changes in radiation energy, also showed strong linkages with temperature changes around the surface, as shown by high correlation (0,7) between the temperature near the surface with the value of the greenhouse effect.

Keywords : *temperature, radiation, greenhouse effect, atmosphere.*

ABSTRAK

Telah dianalisis variasi profil suhu dengan menggunakan data *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)* dari Januari 2003 – Desember 2015 untuk 24 ketinggian atmosfer. Penggunaan persamaan regresi terhadap suhu di 24 ketinggian atmosfer berdasarkan waktu, hasilnya menunjukkan adanya pemanasan di ketinggian atmosfer 70 mb – 30 mb. Lain halnya di ketinggian lainnya menunjukkan pendinginan. Hal ini disebabkan neraca energi turut menentukan tingkat perubahan suhu. *La Niña* yang terjadi pada tahun 2010, menyebabkan melimpahnya uap air, dan ketika terjadi hujan memberikan kontribusi pada peningkatan suhu dan menyebabkan adanya anomali sebesar 3 °C di ketinggian 500 – 150 mb. Selain itu, perubahan energi radiasi, juga menunjukkan keterkaitan yang cukup kuat dengan perubahan suhu di sekitar permukaan, yang ditunjukkan nilai koefisien korelasi sebesar 0,7 antara suhu di dekat permukaan dengan nilai efek rumah kaca.

Kata kunci : *suhu, radiasi, efek rumah kaca, atmosfer.*

1 PENDAHULUAN

Perubahan iklim sampai saat ini masih menjadi isu yang disoroti oleh banyak ilmuwan, terutama yang terkait dengan mekanisme dan faktor-faktor yang berkontribusi pada perubahan iklim. Suhu merupakan parameter penting dalam perubahan iklim, dan perubahan suhu tersebut tidak hanya terjadi di permukaan bumi. Prediksi berdasarkan *General Circulation Model* (GCM) menyatakan bahwa pada abad ke-21 terdapat peningkatan pemanasan maksimum di troposfer, di sekitar 200 hPa (*International Panel in Climate Change/IPCC*, 2007). Kondisi ini memiliki implikasi penting terhadap sensitivitas iklim karena dampaknya pada umpan balik uap air, *lapse rate*, dan awan (Hartmann and Larson, 2002), serta terhadap perubahan sirkulasi atmosfer (Butler dkk., 2010). Bagaimana dengan troposfer atas di daerah tropis? Untuk menjawabnya diperlukan pengujian terhadap validitas prediksi terkait pemanasan maksimum di troposfer atas di daerah tropis. Beberapa studi, seperti yang dilakukan Santer (Santer dkk., 2008), menunjukkan bukti-bukti bahwa perubahan suhu troposfer atas di daerah tropis lebih dari yang terjadi di permukaan dalam skala waktu multi-dekadal, meskipun beberapa analisis masih menunjukkan sebaliknya, seperti yang dilakukan oleh Christy tahun 2007.

Di atmosfer, distribusi kelembapan dan tekanan udara di ketinggian yang bersifat progresif, menghasilkan penurunan suhu sampai ketinggian tropopause, dengan tingkat penurunan yang dipengaruhi oleh faktor-faktor geografis dan kondisi cuaca. Tropopause menandai puncak troposfer, yaitu dengan ketinggian 8 sampai 16 km dari permukaan dan bervariasi berdasarkan lintang dan bujur. Di atas ketinggian ini, sifat fisik dari udara menghasilkan pemanasan yang mengikuti ketinggian stratosfer yang membentang dari tropopause sampai ketinggian kurang lebih ~ 50 km (Fu dkk., 2011).

Profil suhu vertikal atmosfer mencerminkan keseimbangan antara radiasi, konveksi dan dinamika pemanasan/pendinginan dari sistem permukaan bumi-atmosfer. Kombinasi antara sifat fisik dan proses dinamis dari atmosfer, pencampuran panas secara vertikal dan horizontal, akan menghasilkan suhu tertinggi, rata-rata, dengan variasi musiman dan spasial tertentu (Forster dkk., 2007). Kecenderungan suhu permukaan berbeda dari kecenderungan suhu di atmosfer yang lebih tinggi. Hal ini karena adanya perbedaan tipe permukaan, perubahan-perubahan sirkulasi atmosfer atau kecenderungan

variabilitas atmosfer, dan faktor-faktor pendorong (*forcing factors*). Tipe permukaan seperti laut, salju, es, dan tutupan vegetasi, akan membedakan secara signifikan karakteristik fisisnya (Forster dkk., 2007). Faktor-faktor pendorong (*forcing factors*), baik alami (seperti letusan gunung dan sinar matahari) atau antropogenik (seperti gas rumah kaca, aerosol, ozon, dan tataguna lahan) untuk menghasilkan kecenderungan profil suhu yang berbeda, dan variasi vertikal ini dapat berubah sepanjang waktu. Hal ini dapat muncul karena perubahan spasial dan temporal konsentrasi atau karakteristik *forcing agents* (Soden and Held, 2006).

Banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan suhu menyebabkan tingginya tingkat kemungkinan bahwa suhu menunjukkan variabilitas yang tinggi secara horizontal, vertikal, dan spasial. Perkembangan teknologi satelit pada saat ini memungkinkan untuk memperoleh parameter yang terkait dengan perubahan kondisi suhu vertikal dalam lingkup wilayah yang lebih luas. Studi ini bertujuan untuk mengetahui efek perubahan suhu secara horizontal dan vertikal (profil), serta temporal dalam mengungkap keterkaitan perubahan suhu dengan perubahan neraca energi. Melalui studi ini diharapkan memberi gambaran untuk wilayah Indonesia, dimana terjadi perubahan suhu, baik secara vertikal dan horizontal, serta dapat memperoleh gambaran awal keterkaitannya dengan neraca energi radiasi, terutama radiasi inframerah yang berasal dari permukaan bumi yang menimbulkan efek rumah kaca. Hal ini dikarenakan di troposfer, gas-gas penyusun atmosfer kurang efisien dalam menyerap cahaya matahari, namun efisien dalam menyerap energi inframerah yang diemisikan oleh bumi (Gettelman and Forster, 2002).

2 METODE PENELITIAN

Data yang digunakan pada studi ini adalah suhu pada 24 ketinggian berdasarkan tekanan atmosfer dari *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) versi 6. Seluruh data yang digunakan dapat diunduh di ftp://data/s4pa/Aqua_AIRS_Level3/AIRX3STM/006. Format data yang diperoleh dalam bentuk hdf dengan resolusi vertikal 1 km, resolusi horizontal 1 derajat, dan resolusi temporal bulanan dari Januari 2003 sampai Desember 2015. Ketinggian yang dapat digunakan untuk menganalisis suhu berdasarkan data AIRS mencakup 24 level, yaitu 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3, 2, 1,5 dan 1 mb. Parameter yang digunakan

terdiri dari profil suhu pada 24 level ketinggian, suhu permukaan, dan *Outgoing Longwave Radiation* (OLR). Cakupan wilayah yang dianalisis adalah 80 – 150°BT dan 20°LS – 20°LU (meliputi 4 kota yaitu Jakarta, Medan, Makasar, dan Biak).

Metode yang digunakan adalah perbandingan suhu pada 24 ketinggian atmosfer secara spasial. Metode ini digunakan untuk dapat mengidentifikasi dan menganalisis perubahan suhu secara relatif di beberapa lapisan troposfer. Kemudian dilakukan perbandingan temporal dengan menggunakan analisis deret waktu dan menghitung tingkat perubahan suhu selama periode yang dianalisis untuk semua level ketinggian. Untuk dapat mengidentifikasi keterkaitannya dengan perubahan neraca radiasi gelombang pendek atau inframerah yang dipancarkan bumi akan dibuat perbandingan antara kenaikan suhu dengan efek rumah kaca. Efek rumah kaca merupakan indikator yang menggambarkan berapa besar energi inframerah yang terjebak di atmosfer.

Efek rumah kaca merupakan gambaran besarnya energi yang terjebak atau terserap di atmosfer, maka efek rumah kaca dihitung sebagai selisih antara energi inframerah yang dipancarkan oleh permukaan bumi dengan energi inframerah yang keluar atmosfer bumi (*outgoing longwave radiation*). Adapun emisi inframerah diestimasi berdasarkan suhu permukaan. Dalam hal ini bumi diasumsikan sebagai benda hitam, sehingga energi yang diemisikannya adalah σT_s^4 . T_s adalah suhu permukaan, dan σ adalah konstanta Steffan Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) (Ramanathan and Inamdar, 2006)

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengolahan data AIRS dapat diketahui bahwa profil suhu di Indonesia masih mengikuti pola umum, yaitu mengalami penurunan suhu sampai tropopause dan mengalami peningkatan di stratosfer. Gambar 1a menunjukkan profil suhu rata-rata untuk seluruh wilayah kajian dari Januari 2003 – Desember 2015 secara jelas. Hal ini sesuai dengan banyak hasil penelitian lainnya, diantaranya yang dilakukan Hermawan (2009) dengan menggunakan data FORMOSAT-3 dan radiosonde, serta sesuai dengan yang dilakukan oleh Fu dkk. (2011). Di atmosfer pada ketinggian sekitar 17 km atau pada tekanan udara sekitar 100 mb, suhu mulai menunjukkan peningkatan. Nilai minimal profil suhu di Indonesia mencapai -81 °C. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan rata-

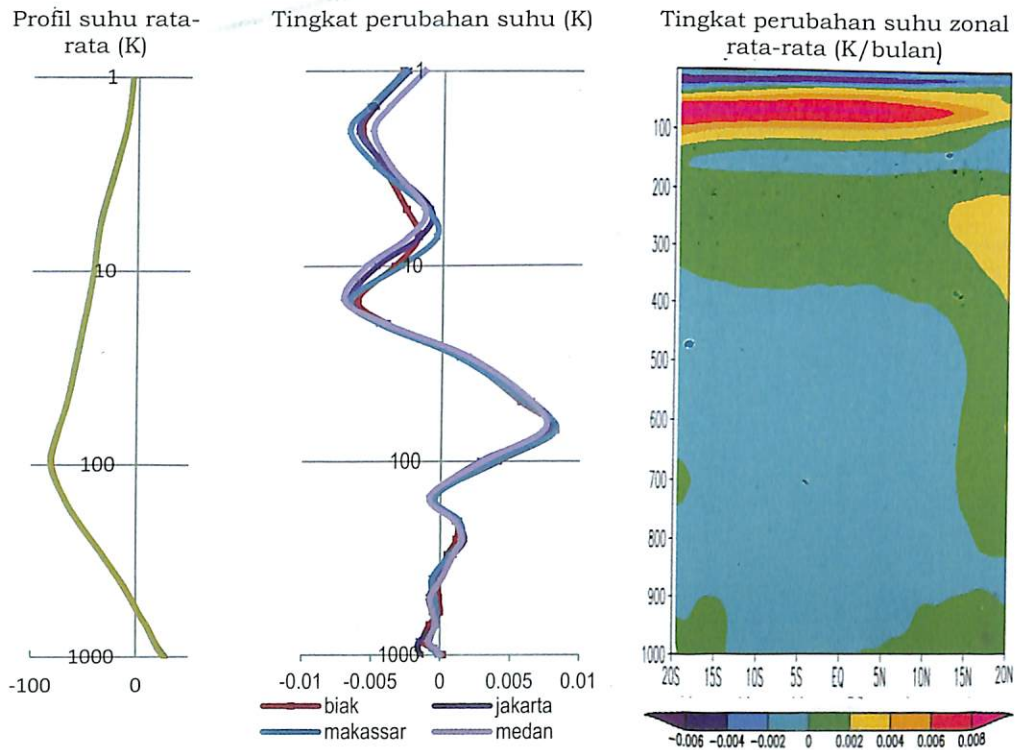
rata suhu Indonesia di permukaan yang bernilai 27,8 °C.

Dengan adanya perubahan komposisi atmosfer, memungkinkan adanya perubahan kondisi suhu atmosfer (Forster dkk., 2007) dengan tingkat perubahan yang berbeda untuk setiap level ketinggian. Gambar 1b menggambarkan tingkat perubahan suhu untuk 24 level ketinggian di beberapa kota. Terdapat dua hal yang dapat dicermati dari gambar tersebut. Pertama, secara vertikal, semua kasus kota yang diamati menunjukkan bahwa perubahan suhu tertinggi terjadi di ketinggian 70 mb, yang berarti berbeda dari yang ditunjukkan dalam laporan IPCC 2007 bahwa peningkatan suhu berdasarkan GCM terjadi di ketinggian atmosfer 200 mb. Berdasarkan data AIRS, suhu pada ketinggian 70 mb di Indonesia mengalami peningkatan sebesar 0,01 °C per bulan dalam periode Januari 2003 – Desember 2015, yang berarti dalam 1 tahun menghasilkan kenaikan suhu sebesar 0,12 °C. Kedua, semua kasus kota yang diamati menunjukkan besaran perubahan suhu yang hampir sama di semua ketinggian atmosfer, kecuali di dekat permukaan dan di stratosfer, terutama untuk 10 – 1 mb. Karena kondisi suhu erat kaitannya dengan keseimbangan energi dan sirkulasi (Forster dkk., 2007), maka variasi suhu yang besar di permukaan dan di stratosfer menunjukkan adanya variasi perubahan neraca energi yang besar kemungkinannya dipengaruhi perubahan komposisi atmosfer dan sirkulasi atmosfer (Grewe dkk., 2001). Perubahan komposisi atmosfer pada umumnya sangat tergantung pada kondisi lokal, yaitu tingkat emisi gas-gas dan partikel tertentu dari suatu daerah (Grewe dkk., 2001). Hal inilah yang kemungkinan menjadi penyebab adanya perbedaan tingkat perubahan suhu permukaan antar daerah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1b.

Besarnya tingkat perubahan suhu pada ketinggian atmosfer 70 mb, terjadi hampir di semua wilayah kajian. Gambar 1c menunjukkan tingkat perubahan suhu rata-rata longitudinal, dimana peningkatan kuat di ketinggian 70 mb sampai 30 mb, lebih cenderung terjadi di belahan bumi selatan dari wilayah kajian. Mengingat lautan di selatan wilayah kajian lebih banyak dibandingkan utara, maka terdapat kemungkinan bahwa lautan memberi kontribusi pada peningkatan suhu di ketinggian 70 mb-30 mb. Adanya peningkatan suhu yang lebih besar pada ketinggian tersebut menunjukkan adanya peningkatan kapasitas atmosfer dalam menampung uap air pada level tersebut, mengingat prinsip dasar atmosfer bahwa atmosfer yang lebih hangat dapat menampung uap air yang lebih banyak (Pierrehumbert, dkk., 2007). Dalam hal ini, perlu adanya penelitian lebih lanjut yang

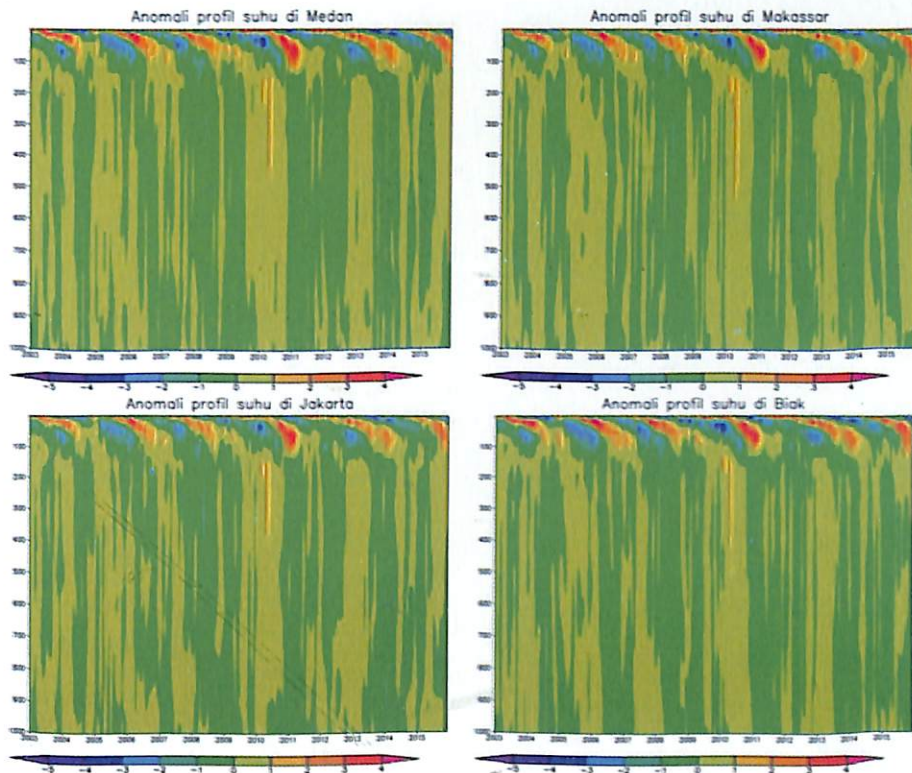
menyebabkan peningkatan pada level tersebut. Di stratosfer yang lebih tinggi dari level tersebut menunjukkan pendinginan yang lebih besar dibandingkan dengan level lainnya. Hal ini sesuai dengan apa diungkapkan oleh Ramaswamy (2001) dan Shine (2003) bahwa di stratosfer terjadi pendinginan yang dikendalikan oleh faktor antropogenik melalui emisi gas rumah kaca dan *ozone-depleting* yang menimbulkan efek radiatif.

Menurut peneliti tingkat perubahan suhu yang dihitung berdasarkan nilai *slope* dari persamaan regresi suhu terhadap waktu, menunjukkan kecenderungan umum yang terjadi dalam skala waktu panjang (dekade atau multi dekade). Perubahan suhu yang terjadi, lebih disebabkan oleh faktor-faktor *forcing* secara gradual dalam jangka waktu panjang.



Gambar 1. Profil suhu rata-rata di Indonesia berdasarkan data AIRS (a) dan tingkat perubahan suhu rata-rata per bulan untuk periode Januari 2003 – Desember 2015 di 24 level ketinggian untuk beberapa kota di Indonesia(b), dan tingkat perubahan suhu zonal rata-rata untuk sampai tekanan atmosfer 1 mb (Sumber : Hasil olahan, 2016).

Jika perubahan gradual dalam jangka panjang ditunjukkan oleh nilai *slope* dari persamaan regresi suhu terhadap waktu, maka perubahan yang bersifat temporer dapat ditunjukkan oleh nilai anomalnya. Gambar 2 berikut, merupakan ilustrasi anomali profil suhu di beberapa kota di Indonesia (Medan, Makassar, Jakarta, Biak) untuk ketinggian atmosfer 1000 mb – 1 mb selama periode Januari 2003 – Desember 2015.



Gambar 2. Anomali profil suhu dari data AIRS periode Januari 2003 – Desember 2015 di Medan, Makassar, Jakarta dan Biak, dari ketinggian atmosfer 1000 mb sampai 1 mb (dalam Kelvin) (Sumber : Hasil olahan, 2016).

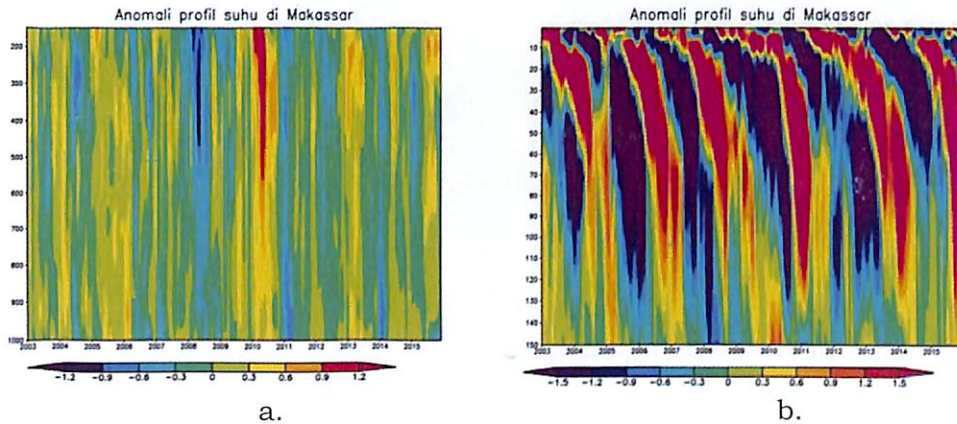
Berdasarkan Gambar 2, dapat diketahui bahwa anomali profil suhu menunjukkan adanya siklus, terutama di ketinggian atmosfer 100 mb – 1 mb. Di beberapa periode, di sekitar ketinggian 100 mb, menunjukkan anomali suhu negatif, namun ketinggian di atasnya menunjukkan anomali positif. Sebaliknya, di periode yang lain, di ketinggian 100 mb menunjukkan anomali positif, dan di ketinggian di atasnya menunjukkan anomali negatif. Pola siklus suhu stratosfer ini,

merupakan hal yang harus digali lebih lanjut. Thompson dkk. (2012) menyatakan bahwa kecenderungan tersebut sampai saat ini masih merupakan hal yang dipertanyakan. Dengan menggunakan data NOAA, Met Office, RSS, dan UAH (data observasi) serta data CCM dan CMIP5, Thompson, dkk. (2012) menunjukkan bahwa di stratosfer terjadi penurunan suhu, dimana data observasi menunjukkan penurunan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan data model. Dalam hal ini, data AIRS menunjukkan pola penurunan yang sama di stratosfer.

Di sekitar permukaan, anomali di keempat kota menunjukkan variasi yang cukup besar. Hanya Biak yang menunjukkan siklus suhu cukup jelas. Kemungkinan hal ini dikarenakan kontribusi faktor antropogenik di Biak lebih kecil dibanding 3 (tiga) kota lainnya, sehingga faktor penyinaran matahari menjadi lebih dominan. Secara umum, keempat kota menunjukkan pola yang hampir sama. Apabila mencermati profil suhu troposfer dalam gambar yang lebih detail dari salah satu kota tersebut (Makassar), terdapat fenomena tersendiri pada tahun 2008 dan 2010. Pada tahun 2008 terjadi anomali negatif yang cukup besar di ketinggian atmosfer 500 – 150 mb (Gambar 3). Sebaliknya, di tahun 2010 terjadi anomali positif yang besar di hampir semua ketinggian troposfer, karena pada tahun 1998 dan 2010 Indonesia mengalami kejadian *La Niña* (LAPAN, et. al. , 2016). Untuk fenomena yang terjadi tahun 2010 dapat dijelaskan melalui peristiwa *La Niña*, dimana di troposfer terdapat muatan uap air yang cukup banyak dan terjadi pelepasan panas laten pada saat terbentuk hujan dan memberi kontribusi pada peningkatan suhu atmosfer dan menyebabkan adanya anomali sampai 3°C.

Uap air di troposfer berperan sebagai faktor kunci dalam pengaturan dinamika troposfer dan merupakan gas rumah kaca yang sangat kuat. (Schneider, dkk., 1999 dalam Ambarsari, 2010). Namun, untuk 2008, tidak terjadi fenomena ENSO yang dapat menjelaskan penurunan suhu tersebut. Dalam hal, perlu ada kajian yang lebih mendalam mengenai hal tersebut. Pada saat ini telah diakui bahwa untuk dapat menganalisis kecenderungan suhu yang terobservasi membutuhkan pemahaman dalam hal perubahan neraca air dan energi global, serta perubahan sirkulasi atmosfer umum. Realisasi ini merupakan hal yang krusial untuk dapat menginterpretasi perubahan-perubahan profil suhu atmosfer. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan-perubahan sirkulasi atmosfer dan konsekuensi dari perubahan-perubahan uap air, awan, presipitasi, fluks radiatif, dan sebagainya. Perubahan neraca energi yang berakibat pada penurunan

suhu tahun 2008, dapat berasal dari perubahan sirkulasi atmosfer global, atau berasal dari adanya kejadian erupsi Gunung Merapi tahun 2007 yang melepaskan aerosol ke stratosfer dan mengurangi masuknya radiasi matahari ke troposfer dalam jangka waktu yang relatif panjang. Hal ini membutuhkan dukungan data yang cukup akurat untuk dapat menjelaskan fenomena tersebut.

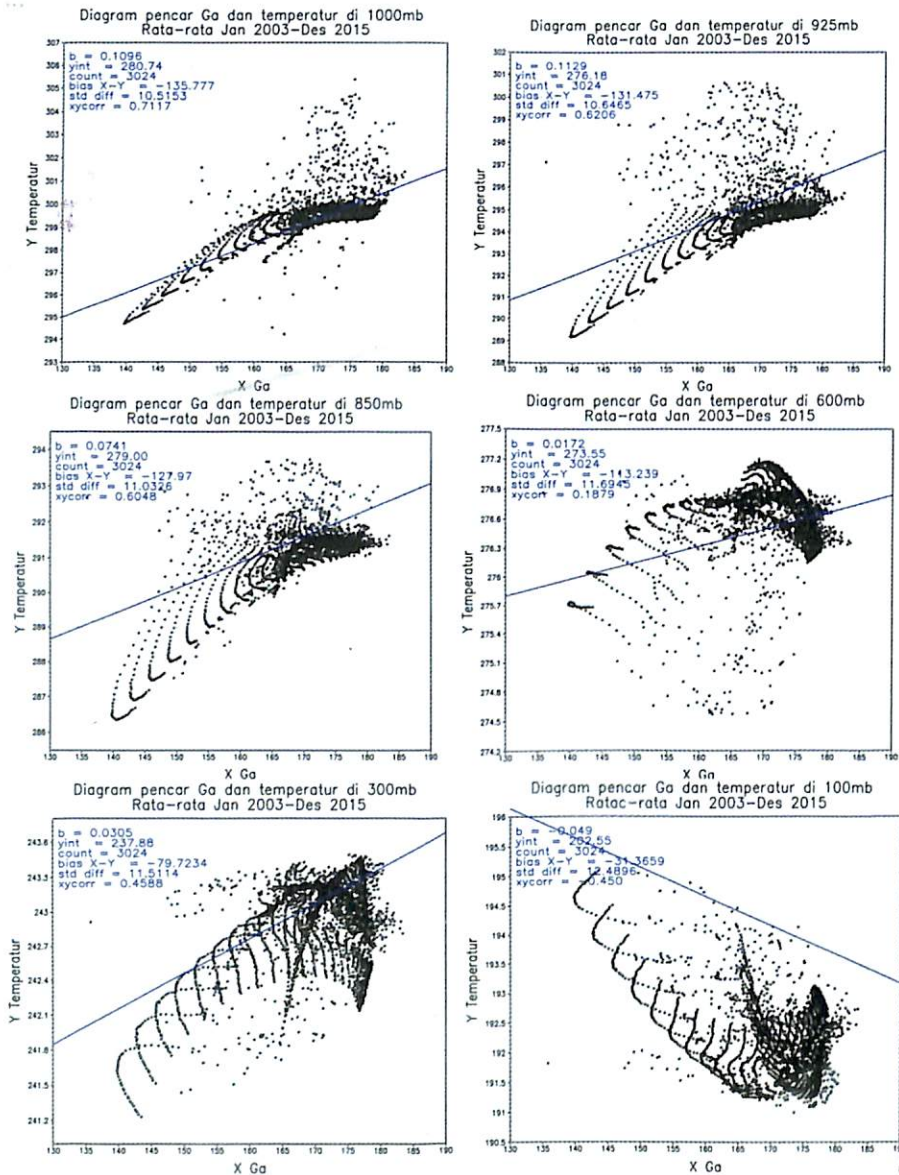


Gambar 3. Anomali profil suhu dari data AIRS periode Januari 2003 – Desember 2015 di Makassar, dari ketinggian atmosfer 1000 mb sampai 150 mb (a), dan 150 mb – 10 mb (b) (Sumber : Hasil olahan, 2016).

Peningkatan suhu tahun 2010, terjadi sampai tropopause. Di stratosfer menengah terjadi penurunan suhu, yang akan mempengaruhi kapasitas udara dalam menampung uap air. Penurunan suhu di stratosfer tersebut, diikuti oleh peningkatan pada periode berikutnya (Gambar 3.b.). Pola ini menunjukkan adanya kemungkinan pengaruh sirkulasi global yang mendominasi pada neraca energi dan mempengaruhi suhu stratosfer.

Kondisi troposfer memberi pengaruh pada kondisi stratosfer, demikian pula sebaliknya, kondisi stratosfer memberi pengaruh pada troposfer. Thorne (2005) mengungkapkan bahwa efek ke atas, dari troposfer ke stratosfer, telah banyak dipahami, namun efek ke bawah, dari stratosfer ke troposfer, sangat kurang dipahami. Meskipun demikian, kemungkinan pengaruh-pengaruh radiatif dan dinamis dari stratosfer terhadap troposfer mulai diungkapkan. Efek radiatifnya mencakup depletasi ozon stratosfer dan perubahan *tropospheric forcing* karena radiasi UV atau gelombang panjang (multidekade), *tropospheric longwave forcing* dari peningkatan gas rumah kaca di stratosfer dalam skala multi dekade, dan dari perubahan uap air stratosfer, *tropospheric*

forcing dari perubahan iradiansi sinar matahari yang disebabkan perubahan ozon dan UV (periodik dan dekadal), serta pengaruh gas-gas dan uap air vulkanik di stratosfer bawah melalui efek radiatif dan pengaruh pada awan sirus (Thorne, 2005).



Gambar 4. Diagram pencar antara efek rumah kaca (Ga) dan suhu rata-rata Januari 2003-Desember 2015 untuk seluruh wilayah kajian pada beberapa level ketinggian atmosfer dengan menggunakan data AIRS

Di troposfer, gas-gas penyusunnya kurang efisien dalam menyerap cahaya matahari, namun efisien dalam menyerap energi inframerah yang diemisikan oleh bumi. Dua gas yang paling efektif sebagai penyerap radiasi inframerah adalah uap air dan karbon dioksida (Gettelman *and* Forster, 2002). Jadi, troposfer bumi lebih cenderung dipanaskan oleh permukaan bumi, tidak oleh sinar matahari secara langsung. Molekul uap air dan karbon dioksida menyerap inframerah yang diemisikan oleh bumi, dan membagi energi tersebut dengan molekul lainnya di troposfer. Istilah efek rumah kaca sering digunakan untuk menggambarkan proses ini, yang mana energi matahari memanaskan bumi, bumi mengemisikan inframerah yang kemudian diserap untuk memanaskan troposfer (Garfinkel, 2013). Efek rumah kaca adalah salah satu isu lingkungan yang paling banyak mendapat perdebatan.

Untuk melihat pengaruh efek rumah kaca pada profil suhu, digunakan analisis diagram pencar antara suhu pada ketinggian tertentu dengan besar efek rumah kaca terhitung. Hasilnya menunjukkan bahwa efek rumah kaca lebih berpengaruh pada suhu dekat dengan permukaan. Gambar 4 menunjukkan diagram pencar antara suhu dan besaran efek rumah kaca terhitung sebagai indikasi berapa besar radiasi gelombang panjang yang terjebak di atmosfer. Korelasi antara suhu dan efek rumah kaca lebih cenderung kuat di sekitar permukaan, dengan nilai korelasi positif sebesar 0.7. Hal ini berarti bahwa penyerapan radiasi inframerah lebih banyak terjadi di permukaan. Kemungkinan hal ini terjadi karena sifat mampat dari atmosfer, dimana densitas atmosfer lebih tinggi di sekitar permukaan.

Dengan mengingat posisi gas rumah kaca dan mekanismenya ada di atmosfer atas, sedangkan efek rumah kaca lebih berkaitan dengan suhu di permukaan, maka hal ini memunculkan pertanyaan, apakah gas rumah kaca lebih bersifat menyerap radiasi atau memantulkan? Jika lebih banyak memantulkan atau memencarkan, maka hal ini 'kurang' sesuai dengan apa yang diungkapkan oleh Gettelman *and* Forster (2002) bahwa gas rumah kaca cenderung menyerap radiasi inframerah. Atau mungkin pernyataan tersebut pada dasarnya hanya ditujukan untuk perbandingan mana yang lebih besar peranan gas rumah kaca dalam penyerapan radiasi inframerah/gelombang panjang atau penyerapan gelombang pendek. Konteks uraian Gettelman *and* Forster (2002) lebih menunjukkan bahwa pemanasan di atmosfer adalah karena radiasi gelombang panjang, bukan karena pemanasan dari sinar matahari langsung. Selain itu juga perlu dikaji dari sisi

perbedaan data yang digunakan.

Berdasarkan nilai *slope* antara suhu dan efek rumah kaca, di permukaan menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yang berarti bahwa di sekitar permukaan, suhunya lebih sensitif terhadap perubahan efek rumah kaca, atau terhadap perubahan neraca radiasi gelombang panjang.

4 KESIMPULAN

Peningkatan suhu berkaitan dengan neraca radiasi dan neraca air serta sirkulasi atmosfer. Oleh karena itu, penyerapan radiasi akan memberikan kontribusi pada suhu. Berbagai proses yang terjadi di atmosfer, menyebabkan adanya perbedaan perubahan profil suhu. Dari hasil analisis data AIRS, menunjukkan adanya pemanasan di ketinggian atmosfer 70 mb – 30 mb. Sedangkan di ketinggian lainnya menunjukkan pendinginan. Dalam hal ini, neraca energi akan menentukan tingkat perubahan suhu. *La Niña* yang terjadi pada tahun 2010, menyebabkan melimpahnya uap air, dan ketika terjadi hujan memberikan kontribusi pada peningkatan suhu melalui pelepasan panas laten di atmosfer. Selain itu, perubahan energi radiasi juga menunjukkan korelasi yang cukup kuat dengan perubahan suhu di sekitar permukaan sebagai efek rumah kaca.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sri Kaloka yang telah memberi bimbingan dalam penelitian yang terkait dengan persoalan gas rumah kaca sebagai bagian dalam penelitiannya.

DAFTAR RUJUKAN

- Butler, A. H. , D. W. J. Thompson, and R. Heikes, 2010: The steady-state atmospheric circulation response to climate change-like thermal forcings in a simple general circulation model. *Journal of Climate*, 23, 3474–3496, doi:10. 1175/2010JCLI3228. 1.
- Forster, P. , V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

- Fu, Q. , S. Manabe, and C. M. Johanson, 2011: On the warming in the tropical upper troposphere: Models versus observations, *Geophys. Res. Lett.* , 38, L15704, doi: 10. 1029/2011GL048101.
- Garfinkel, C. I. , D. W. Waugh, L. D. Oman, L. Wang, and M. M. Hurwitz, 2013: Temperature trends in the tropical upper troposphere and lower stratosphere: Connections with sea surface temperatures and implications for water vapor and ozone, *J. Geophys. Res. Atmos.* , 118, 9658–9672, doi:10. 1002/ jgrd. 50772.
- Gettelman, A. and Forster, P. M. F. , 2002: A Climatology of the Tropical Tropopause Layer, *J. Met. Soc. Jpn.* , 80, 911–924.
- Grewe, V. , M. Dameris, R. Hein, R. Sausen and B. Steil, 2001: Future changes of the atmospheric composition and the impact of climate change, *Tellus (2001)*, 53B, 103–121, ISSN 0280–6509
- Hartmann, D. L. , and K. Larson, 2002: An important constraint on tropical cloud-climate feedback, *Geophys. Res. Lett.* , 29(20), 1951, doi:10. 1029/2002GL015835.
- Hermawan, E. , 2009: Profil vertikal suhu atmosfer di atas Indonesia berbasis hasil analisis data satelit Formosat-3/COSMIC, *Jurnal Sains Dirgantara Vol. 7 No. 1 Desember 2009*: 176-200.
- IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S. , Qin, D. , Manning, M. , Chen, Z. , Marquis, M. , Averyt, K. B. , Tignor, M. , and Miller H. L. (Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, U. S. A. , pp 996.
- LAPAN, WFP, Kementerian Pertanian, FAO, BPS, BNPB dan BMKG, 2016: *Buletin Pemantauan Ketahanan Pangan di Indonesia Fokus Utama: La Nina, Volume 3 Agustus*.
- Novita, A., 2010: *Kajian Pengaruh Uap Air Terhadap Perubahan Iklim*, *Berita Dirgantara Vol. 11 No. 3 September*:93-98.
- Pierrehumbert, H. Brogniez, and R. Roca, 2007: On the relative of the atmosphere. *The Global Circulation of the Atmosphere*, T. Schneider and A. H. Sobel, Eds. , Princeton University Press, 143-185.
- Ramanathan, V. and A. Inamdar, 2006: *The radiative forcing due to clouds and water vapor*, *Frontiers of Climate Modeling*, Published by Cambridge University Press.
- Ramaswamy, V. , M. L. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Koshelkov, K. Labitzke, J. J. R. Lin, A. O'Neill, J. Nash, W. Randel, R. Rood, K. Shine, M. Shiotani, and R. Swinbank, 2001: *Stratospheric temperature trends: observations*

- and model simulations. *Rev. Geophys.* 39, 71–122.
- Santer, B. D. , P. W. Thorne, L. Haimberger, K. E. Taylor, T. M. L. Wigley, J. R. Lanzante, S. Solomon, M. Free, P. J. Gleckler, P. D. Jones, T. R. Karl, S. A. Klein, C. Mears, D. Nychka, G. A. Schmidt, S. C. Sherwood, and F. J. Wentz, 2008: Consistency of modeled and observed temperature trends in the tropical troposphere, *Int. J. Climatol.* , 28, 1703–1722, doi:10. 1002/joc. 1756
- Shine, K. P. , M. S. Bourqui, P. M. de F. Forster, S. H. E. Hare, U. Langematz, P. Braesicke, V. Grewe, M. Ponater, C. Schnadt, C. A. Smith, J. D. Haigh, J. Autin, N. Butchart, D. T. Shindell, W. J. Randel, T. Nagashima, R. W. Portmann, S. Solomon, D. J. Seidel, J. Lanzante, S. Klein, V. Ramaswamy and M. D. Schwarzkopf, 2003: A comparison of model-simulated trends in stratospheric temperatures. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 129, 1565–1588.
- Soden B. F. and I. M. Held, 2006: An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean-Atmosphere Models. *J. Climate*, 19: 3354-3360.
- Thompson, D. W. J. , D. J. Seidel, W. J. Randel, C. Zou, Amy H. Butler, C. Mears, A. Osso, C. Long & R. Lin, 2012: The mystery of recent stratospheric temperature trends, *Nature* Vol. 491, Macmillan Publishers Limited, doi:10. 1038/nature11579, pp 692-697.
- Thorne, P. W. , 2005: Vertical profile of temperature trends. *American Meteorological Society*, DOI:10. 1175/BAMS-86-10-1471.