

## **ANALISIS SPASIAL PERUBAHAN RADIASI DI *TOP OF ATMOSPHERE* (TOA)**

**Rosida dan Indah Susanti**

Lembaga Penerbangan Dan Antariksa Nasional (LAPAN)

e-mail: rosida2009@gmail.com; indahpl@gmail.com

### **ABSTRAK**

Radiasi netto Bumi adalah keseimbangan antara energi yang masuk dan yang keluar di *Top Of Atmosphere* (TOA) (atas atmosfer). Radiasi netto Bumi ini adalah total energi yang tersedia untuk mempengaruhi iklim. Energi datang ke dalam sistem pada saat sinar matahari menembus TOA. TOA merupakan lapisan di mana terjadi interaksi pertama antara atmosfer dan radiasi matahari. Lapisan ini berada pada ketinggian kurang lebih 20 km di atas permukaan Bumi. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan fluks radiasi gelombang panjang dan gelombang pendek di lapisan TOA di wilayah Indonesia. Fokus dari penelitian adalah untuk menganalisis kecenderungan pemanasan atau pendinginan suatu daerah di wilayah Indonesia dengan menganalisis secara spasial fluks radiasi di TOA. Data yang digunakan adalah dari sensor-satelit CERES (*The Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) dengan periode data sekitar 11 tahun dari 2000-2010. Metoda penelitian dilakukan dengan menentukan nilai rata-rata spasial bulanan dan musiman untuk menunjukkan variabilitasnya. Berdasarkan pengolahan data, dapat diketahui bahwa di Indonesia terjadi anomali fluks radiasi di TOA yang besar pada tahun 2006. Anomali tersebut berkaitan dengan peningkatan polutan yang terjadi pada tahun 2006 akibat peristiwa kebakaran hutan.

Kata-kata kunci: CERES, Indonesia, Radiasi, *Top-of atmosphere* (TOA)

### **ABSTRACT**

The Earth's net radiation is energy balance between incoming and outgoing at the top of the atmosphere/TOA (upper atmosphere). This Earth's net radiation is the total energy available to affect the climate. Energy comes into the system when the sun go through the TOA. TOA is the layer where there is first interaction between the atmosphere and solar radiation. This layer is located at an altitude of approximately 20 km above the earth's surface. In this research is conducted observation of longwave radiation flux and the shortwave at TOA layer in the region of Indonesia. Focus of the research is to analyze trend of heating or cooling an area in

Indonesia by analyzing the spatial radiation flux at TOA. The data used are from the CERES satellite sensors (The Clouds and the Earth's Radiant Energy System) with a period of about 10 years of data from 2000 to 2010. The method of research is conducted by determining the average value of the monthly spatial and seasonal to show the variability. Based on data processing, it can be seen that in Indonesia occurred at the TOA radiation flux anomalies are large in 2006. The anomaly is associated with an increase in pollutants that occurred in 2006 due to the fires.

Keywords: CERES, Indonesia, Radiation, *Top-of atmosphere* (TOA).

## 1 PENDAHULUAN

Radiasi netto Bumi adalah keseimbangan antara energi yang masuk dan yang keluar di *Top Of Atmosfer/TOA* (atmosfer atas). Radiasi netto Bumi ini adalah total energi yang tersedia untuk mempengaruhi iklim. Energi datang ke dalam sistem Bumi pada saat sinar matahari menembus TOA. Energi keluar dengan dua cara, cara yang pertama dengan refleksi oleh awan, aerosol, atau permukaan Bumi, dan cara lain yaitu melalui termal radiasi panas yang dipancarkan oleh permukaan dan atmosfer, termasuk awan. Radiasi netto rata-rata global harus mendekati nol selama rentang setahun, karena kalau tidak maka suhu rata-rata akan naik atau bahkan akan turun (Loeb, dkk., 2009).

Berdasarkan kesetimbangan *budget* radiasi global rata-rata tahunan bahwa radiasi matahari gelombang pendek (*shortwave*, SW) yang masuk, direfleksikan atau dihamburkan secara langsung kembali ke angkasa oleh atmosfer dan sebagian lagi di absorpsi oleh Bumi dan atmosfer. Pada saat radiasi diabsorpsi, permukaan Bumi dan atmosfer mengemisikan kembali energi ini dalam bentuk radiasi gelombang panjang (*longwave*, LW) inframerah (Trenberth, dkk., 2009). Satuan yang digunakan untuk fluks energi tersebut dinyatakan dalam satuan  $W/m^2$ .

Fasullo dan Trenberth, (2008), menjelaskan bahwa dari radiasi yang masuk, sekitar 47% diserap oleh permukaan Bumi. Panas yang dikembalikan ke atmosfer dalam berbagai bentuk seperti proses evaporasi dan radiasi termal. Sebagian besar dari panas yang mengalir ke atas diserap oleh atmosfer, kemudian dipancarkan kembali sebagai radiasi termal inframerah

(gelombang panjang, LW), baik yang mengarah ke atas maupun yang ke bawah. Sebagian lagi hilang ke angkasa, dan sebagian lagi tetap berada dalam sistem iklim Bumi. Efisiensi di mana Bumi dapat mendinginkan angkasa melalui radiasi termal inframerah (gelombang panjang) ditentukan oleh efek rumah kaca. Kondisi ketidakseimbangan antara sinar matahari yang di absorpsi dan radiasi termal yang dilepaskan keluar menentukan apakah Bumi akan bertambah panas atau bahkan akan menjadi lebih dingin. Berdasarkan hasil pengamatan yang terbaru yang di laporkan dalam *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013), menunjukkan adanya akumulasi panas oleh Bumi (terutama dalam lautan) sebesar  $0,6 \text{ Wm}^{-2}$ . Nilai tersebut mungkin tampak kecil namun dimungkinkan dapat menjadi pengendali terjadinya perubahan iklim global.

TOA merupakan lapisan di mana terjadi interaksi pertama antara atmosfer dan radiasi matahari dan lapisan ini berada pada ketinggian kurang lebih 20 km di atas permukaan Bumi. TOA ini berbentuk *ellipsoid* dengan persamaan  $x^2/a^2 + y^2/a^2 + z^2/b^2 = 1$ , di mana  $a = 6408.1370 \text{ km}$  dan  $b = 6386.6517 \text{ km}$ . Setelah melewati TOA, radiasi masuk ke lapisan berikutnya yang berisi sejumlah gas, awan, aerosol dan zat-zat lainnya sebelum pada akhirnya mencapai permukaan Bumi. Radiasi matahari dipencarkan dan/atau diserap dalam setiap lapisan material ini, sedangkan zat-zat di atmosfer dan di permukaan mengemisikan radiasinya sendiri. Gelombang pendek (SW) dan gelombang panjang (LW) merupakan bagian spektrum utama dari energi yang dapat dibagi secara lebih detail menjadi interval spektrum yang lebih kecil, tergantung pada spesifik proses-proses fisis yang dikaji.

Laing (2011) mempresentasikan bagaimana distribusi radiasi matahari yang datang (*shortwave*) dan radiasi inframerah yang dilepaskan (*longwave*) divariasikan dengan lintang (suatu ukuran jarak dari ekuator). Daerah tropis mengabsorpsi energi netto dari energi matahari dengan jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan jumlah radiasi gelombang panjang yang dilepaskan. Daerah kutub akan secara kontinyu kehilangan panas. Hal tersebut berarti bahwa daerah tropis akan terus memanas dan kutub akan semakin dingin, namun pada kenyataannya tidak terjadi seperti itu. Bumi secara kontinyu

memompa atau mengalirkan panas dari daerah tropis ke daerah kutub, seperti mesin pemanas. Sirkulasi atmosfer Bumi dan lautan yang dipengaruhi oleh mekanisme pemompaan yang membawa kira-kira sejumlah energi yang sama dari khatulistiwa ke kutub.

Letak Indonesia yang berada pada posisi garis lintang 6°LU sampai dengan 11°LS dilintasi oleh garis khatulistiwa. Posisinya tersebut menjadikan Indonesia termasuk wilayah yang berada di daerah iklim tropis. Indonesia adalah daerah yang mendapat limpahan sinar matahari sepanjang tahun. Artinya Indonesia terletak pada daerah yang mendapat surplus sinar matahari.

Pertanyaan pada penelitian ini adalah bagaimana kondisi kesetimbangan radiasi di TOA wilayah Indonesia pada saat ini ?, dan apakah faktor antropogenik memberikan pengaruh terhadap kesetimbangan fluks radiasi di TOA wilayah Indonesia?. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi dan menganalisis variabilitas kesetimbangan fluks radiasi di TOA, serta menganalisis perkiraan faktor antropogenik yang diduga mempengaruhi fluks radiasi di TOA.

## 2 DATA DAN METODOLOGI

Data radiasi yang digunakan pada penelitian ini adalah data rata-rata bulan yang diperoleh dari Aqua-CERES resolusi data 1°x1°. Rentang waktu data yang digunakan yaitu dari 2000 – 2010. Format data HDF, yang terdiri dari data : *shortwave downward* dan *upward radiation fluxs*, *longwave downward* dan *upward radiation fluxs*, serta *net shortwave* dan *longwave radiation fluxs*. Semua data yang dianalisis dalam kondisi cerah dan semua kondisi di TOA.

Lokasi penelitian adalah Indonesia, dan sebagai studi kasus yang berkaitan dengan peristiwa kebakaran hutan adalah Kalimantan dan Sumatera. Keseimbangan radiasi di TOA diekspresikan dalam persamaan budget radiasi, yang terdiri dari istilah-istilah yang berbeda yang masing-masing mempresentasikan transpor radiasi atau proses konversi.

$$Q^* = (K\downarrow - K\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \text{ [Units: } W \text{ m}^{-2}\text{]}$$

$$= K^* + L^* \quad (1)$$

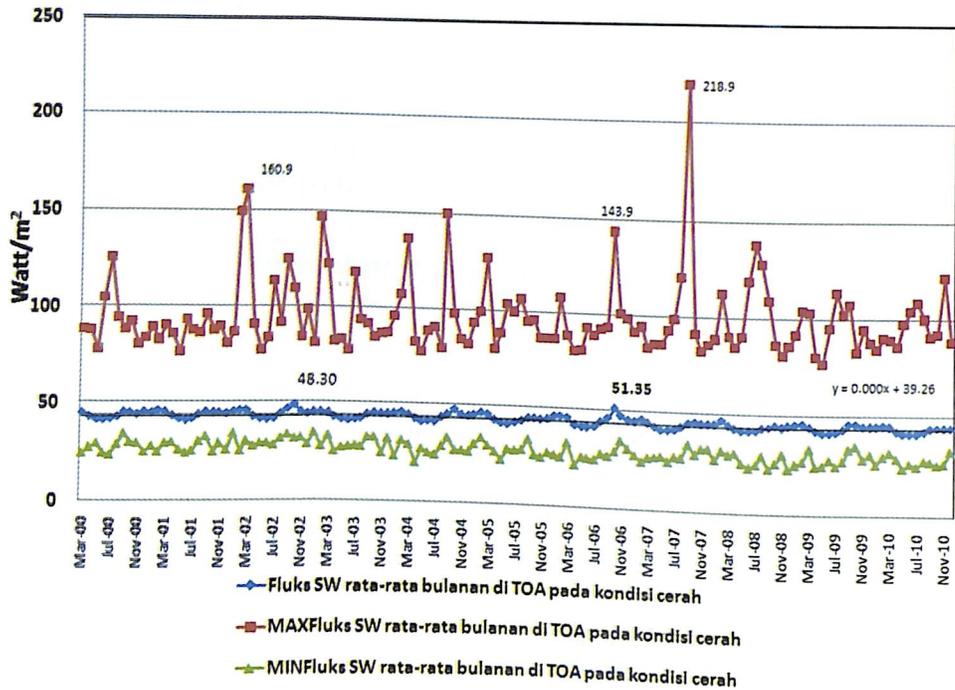
- $Q^*$  : *radiasi netto all wave radiation*  
 $K^*$  : *net shortwave radiation*  
 $K_{\downarrow}$  : *incoming shortwave radiation*  
 $K_{\uparrow}$  : *outgoing shortwave radiation*  
 $L^*$  : *net longwave radiation*  
 $L_{\downarrow}$  : *incoming longwave radiation*  
 $L_{\uparrow}$  : *outgoing longwave radiation*

Pengolahan data dikerjakan dengan menggunakan perangkat lunak GrADS. Pengolahan data diawali dengan menentukan nilai rata-rata spasial bulanan dan musiman untuk menunjukkan variabilitasnya menggunakan analisis statistik sederhana. Analisis kemungkinan adanya fenomena ekstrim dilakukan dengan menganalisis nilai anomalnya yang ditentukan dengan standar deviasinya.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh bahwa variabilitas fluks radiasi gelombang panjang dan gelombang pendek di puncak atmosfer (TOA) menunjukkan adanya variasi bulanan dan musiman. Pola rata-rata bulan baik untuk fluks radiasi matahari gelombang pendek maupun untuk radiasi terrestrial menunjukkan pola yang sangat berfluktuatif. Analisis dilakukan terhadap perubahan yang terjadi baik dalam kondisi cerah maupun tidak cerah (semua kondisi). Pada semua kondisi, jumlah fluks radiasi netto di TOA untuk gelombang panjang (LW) nilainya lebih besar dari pada fluks gelombang pendek (SW), dan nilainya hampir mencapai 2 kali lipat. Pada semua kondisi, fluks radiasi netto gelombang panjang (LW) yang sampai di TOA rata-rata berkisar antara 260 – 300 Watt/m<sup>2</sup>, dan fluks gelombang pendeknya (SW) antara 130 - >150 watt/m<sup>2</sup>.

Pada kondisi cerah rata-rata bulan fluks radiasi LW berfluktuasi dari 265 - 300 watt/m<sup>2</sup>, dan rata-rata bulan fluks radiasi SW di TOA bervariasi antara 80 - 125 watt/m<sup>2</sup>. Pada kondisi yang tidak cerah (semua kondisi), pola variabilitas radiasi LW bulanan menunjukkan pola yang tidak beraturan.



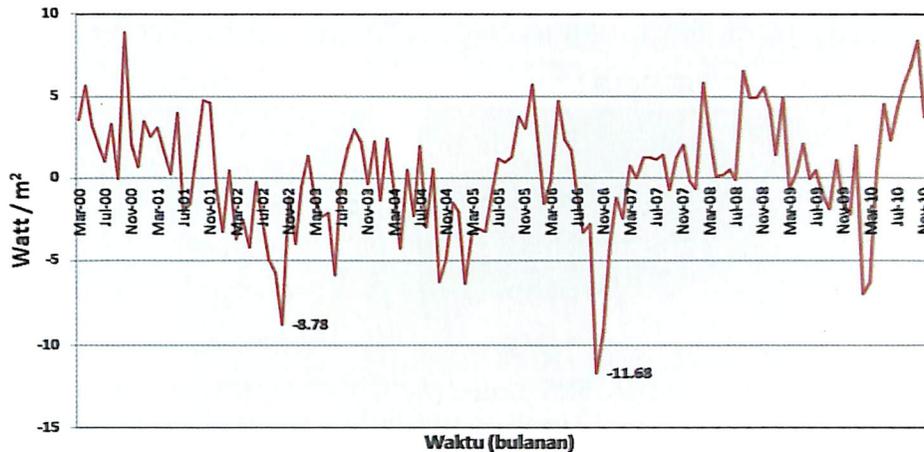
**Gambar 1.** Fluks radiasi matahari bulanan di Top Of Atmosphere (TOA) pada kondisi cerah.

Hal ini terjadi karena pengaruh dari banyak faktor, dan mengingat juga radiasi LW ini merupakan radiasi yang dipantulkan, diemisikan dari permukaan oleh berbagai materi yang ada di permukaan dan di atmosfer yang mempunyai kemampuan untuk mengemisikan, menghamburkan bahkan mengabsorpsi radiasi matahari. Jumlah radiasi LW pada kondisi cerah jauh lebih besar dibandingkan jumlah radiasi LW di TOA pada kondisi yang tidak cerah.

Radiasi matahari SW rata-rata bulannya di TOA pada kondisi cerah berfluktuasi antara >180 watt/m<sup>2</sup> sampai <95 watt/m<sup>2</sup>. Berdasarkan hasil analisis data dari bulan Maret 2000 sampai dengan Desember 2010 memperlihatkan variabilitas yang cenderung meningkat dengan bentuk pola bulannya yang cenderung simetris.

Berdasarkan pola variabilitasnya pada Gambar 1, mempresentasikan bahwa pada bulan Oktober 2002 dan bulan Oktober 2006 menunjukkan nilai maksimum yang lebih besar

dari rata-rata jumlah fluktuasinya. Pada bulan Oktober 2002 dicapai nilai maksimm 160,9, sementara rata-rata bulan fluks radiasi SW di TOA pada bulan Oktober 2006 adalah 51,35 watt/m<sup>2</sup>, dan fluks maksimumnya adalah 218,9 watt/m<sup>2</sup>.

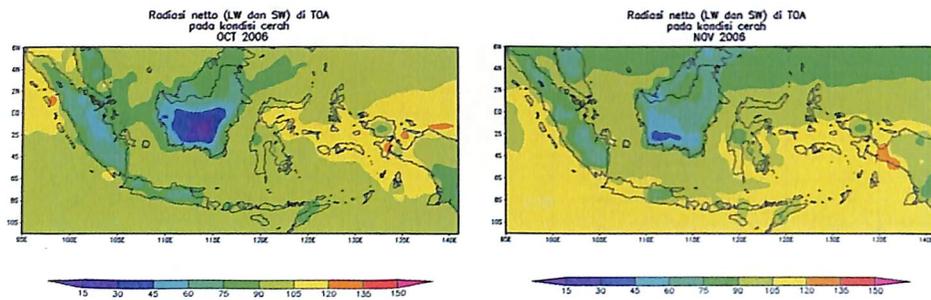


**Gambar 2.** Anomali radiasi netto (LW & SW) di TOA pada kondisi cerah, Maret 2000 sampai Desember 2010.

Anomali SW di TOA pada kondisi cerah mempresentasikan adanya peningkatan fluks radiasi SW di daerah Kalimantan seluas lebih dari 50% lahan yang mengalami kenaikan fluks radiasi SW di daerah ini dengan nilai peningkatan jumlah fluks radiasi SW > 12 watt/m<sup>2</sup>. Peningkatan jumlah fluks ini juga terjadi di daerah Sumatera yang melingkupi hampir 50% luasan daerah Sumatera. Pada kondisi yang tidak cerah, radiasi matahari SW di TOA menunjukkan pola yang simetris untuk variabilitas rata-rata fluks radiasi total netto bulanannya yaitu antara 50 sampai >150 watt/m<sup>2</sup>. Fluks radiasi netto SW di TOA pada semua kondisi mencapai rata-rata nilai rata-rata antara 130 – 150 Watt/m<sup>2</sup>. Pada kondisi cerah (bersih tanpa awan), maksimum fluks radiasi netto untuk SW nya di TOA lebih kecil dibandingkan dengan fluks radiasi netto pada semua kondisi, yaitu < 80 Watt/ m<sup>2</sup>.

Anomali fluks radiasi total netto di TOA bervariasi antara (minus) -15 watt/m<sup>2</sup> sampai kira-kira 10 watt/m<sup>2</sup>. Berdasarkan anomali ini terjadi penurunan fluks radiasi total netto di TOA pada kondisi cerah sampai -11,68 watt/m<sup>2</sup> (Gambar 2).

Anomali fluks radiasi total netto di TOA pada semua kondisi juga menunjukkan adanya penurunan fluks radiasi pada waktu yang sama yaitu pada bulan Oktober 2006, namun penurunannya sedikit lebih kecil dibandingkan dengan penurunan yang terjadi pada kondisi cerah. Selisih yang terjadi tersebut diperkirakan akibat dari adanya materi di atmosfer.



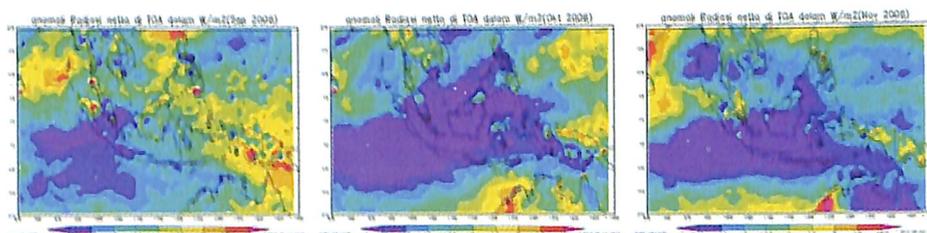
**Gambar 3.** Penurunan fluks radiasi netto (LW & SW) di TOA pada kondisi cerah, pada bulan Oktober 2006 dan November 2006 di daerah Kalimantan.

Fluks dari radiasi total netto yang terjadi di TOA cukup bervariasi, dan menunjukkan siklus yang selalu berulang dari tahun ke tahun. Pada bulan JJA, fluks radiasi netto di TOA menurun dan mencapai minimum antara bulan Juni dan Juli. Kemudian meningkat lagi pada saat menjelang musim penghujan SON.

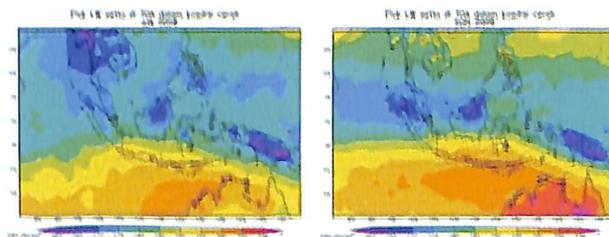
Ruang lingkup daerah kajian kemudian dipersempit, agar analisis lebih terfokus. Daerah Kalimantan dipilih sebagai 'fokus daerah kajian karena berdasarkan informasi di daerah Kalimantan ini sering kali terjadi kebakaran hutan yang merupakan ulah pengusaha hutan dalam membersihkan sisa-sisa penebangan batang pohon.

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan yang cukup signifikan dari total fluks net radiasi (LW dan SW) di atmosfer atas (TOA) pada bulan November yang mencapai maksimumnya pada bulan Oktober 2006.

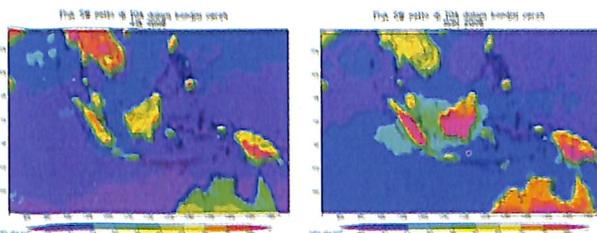
a). Tren Anomali radiasi total netto di TOA, cerah.



b). Penurunan Fluks LW netto di TOA



c). Peningkatan Fluks SW netto di TOA



**Gambar 4.** Tren anomali radiasi total netto di TOA pada kondisi cerah dengan fluks radiasi LW netto dan SW netto di TOA pada kondisi cerah, pada 2006 di Kalimantan.

Jika dianalisis penurunan fluks radiasi gelombang panjang (LW), dan terjadinya peningkatan fluks radiasi gelombang pendek di TOA, diperkirakan berkaitan dengan adanya pengaruh dari unsur-unsur gas rumah kaca pada level tersebut. Pada Gambar 4 digambarkan keterkaitan antara penurunan nilai fluks pada anomali radiasi total netto di TOA pada kondisi cerah terhadap fluks LW netto di TOA dan fluks SW netto di TOA.

Hasil analisis dari seluruh data yang digunakan, maka untuk total fluks net radiasi di TOA, data bulan Oktober 2006 merupakan data satu-satunya yang menunjukkan anomali dengan nilai minimum paling rendah. Hal tersebut diperkirakan ada keterkaitannya dengan akumulasi gas rumah kaca dari

peristiwa kebakaran hutan yang terjadi pada saat itu. Penurunan fluks radiasi yang terjadi pada peristiwa tersebut mencapai  $< 45$  watt/m<sup>2</sup>.

Anomali radiasi SW netto di TOA pada semua kondisi menurunkan fluks radiasi di daerah di sekitar Kalimantan sampai  $< -12$  watt/m<sup>2</sup>, sementara di Kalimantan sendiri justru terjadi peningkatan fluks radiasi sampai  $> 9$  watt/m<sup>2</sup>, hal ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik lahan gambut yang terdapat di Kalimantan.

Keterkaitan antara penurunan fluks radiasi LW di TOA dan peningkatan fluks radiasi SW di TOA diperkirakan ada korelasinya dengan akumulasi materi antropogenik yang di emisikan pada peristiwa kebakaran yang terjadi di Kalimantan saat itu (2006).

Mengingat pentingnya hal tersebut, maka perlu dilakukan suatu penelitian yang membahas secara mendetail tentang pengaruh akumulasi materi yang diemisikan dari kebakaran hutan terhadap radiasi di TOA, baik terhadap *incoming* radiasi (*shortwave*), radiasi terrestrial maupun radiasi netto secara rata-rata bulan dan musiman.

#### 4 KESIMPULAN

Hasil analisis baik untuk fluks radiasi netto SW, fluks radiasi netto LW dan fluks radiasi total nettonya di TOA, menjelaskan bahwa kondisi lingkungan atmosfer sangat mempengaruhi pada *budget* radiasi.

Umumnya, baik pada kondisi cerah maupun pada kondisi yang tidak cerah (semua kondisi), fluks radiasi netto gelombang panjang (LW) rata-rata bulan di TOA nilainya antara 260 – 300 watt/m<sup>2</sup> yang nilainya hampir mencapai 2 kali lipat lebih besar dari fluks netto gelombang pendek (SW), yang nilainya hanya antara 130 - 150 watt/m<sup>2</sup>.

Faktor antropogenik diperkirakan memberikan peranan yang cukup penting dalam mempengaruhi kesetimbangan *budget* radiasi. Seperti pada kasus kebakaran hutan yang cukup besar yang terjadi di Kalimantan pada sekitar Oktober 2002 dan 2006, yang mengemisikan materi antropogenik dalam jumlah yang sangat banyak. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan

fluks radiasi netto SW di TOA, tapi menurunkan fluks radiasi netto LW nya.

Hasil analisis terhadap total fluks netto radiasi di TOA, maka data bulan Oktober 2006 menunjukkan adanya penurunan total fluks radiasi netto yang ditunjukkan dengan nilai anomali paling rendah di bawah  $-12 \text{ watt/m}^2$ .

### **Ucapan Terima Kasih**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN Bandung yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para pemberi resensi (*reviewer*) makalah ini yang telah membantu kami dalam mengkoreksi, memperbaiki hingga terselesaikannya makalah ini.

### **DAFTAR RUJUKAN**

- Fasullo, J., K. Trenberth, 2008: The Annual Cycle of the Energy Budget. Part II: Meridional Structures and Poleward Transports. *J. Climate*, **21**, 2313-2325.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Laing, A., and Jenni-Louise Evans, J.E., 2011: Introduction to Tropical Meteorology. *The COMET Program and National Center for Atmospheric Research 2nd edition*, **2.0**, [http://www.goesr.gov/users/comet/tropical/textbook\\_2nd\\_edition/print\\_1.htm](http://www.goesr.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/print_1.htm)
- Loeb, N. G., B. A. Wielicki, D. R. Doelling, G. L. Smith, D. F. Keyes, S. Kato, N. M. Smith, and T. Wong., 2009: Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget. *J. Clim.*, **22**, 748-766, doi:10.1175/2008JCLI2637.1.
- Pidwirny, M., 2010: Energy balance of Earth, Atmospheric Science, NASA, The Encyclopedia Of Earth., <http://www.eoearth.org/view/article/152458/>
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, and J. Kiehl, 2009: Earth's Global Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 311-323