

**PENGARUH AEROSOL TERHADAP FLUKS RADIASI NETO DAN
RADIATIVE FORCING DI PUNCAK ATMOSFER DAN DI PERMUKAAN
BERDASAR DATA SATELIT
(THE INFLUENCE OF AEROSOL ON THE NET RADIATION FLUX AND
RADIATIVE FORCING AT THE TOP OF ATMOSPHERE AND SURFACE
BASED ON SATELLITE DATA)**

Rosida dan Indah Susanti

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

Jln. Dr. Djundjunaan No. 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: rosida2009@gmail.com

Diterima 12 Oktober 2016; Direvisi 8 Mei 2017; Disetujui 19 Juli 2017

ABSTRACT

The direct effects of aerosols on radiation budget in Indonesia have been analyzed based on radiation flux data from the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instrument and aerosol optical depth (AOD) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) – Terra. Radiation budget calculated included the short wave and long-wave radiation. Data from time period of March 2000 until February 2010 were processed in order to analyze the influence of aerosols on the net radiation and to obtain the value of aerosol radiative forcing. Net radiation in clear sky was estimated by using the slope method. The analysis showed the high temporal variation of aerosols density in the atmosphere with AOD_{max} value >2.5 , which generally caused the decreases of net radiation flux, and led to a cooling effect. The influence of aerosols on the net radiation flux could be very clearly seen during the forest fires. Forest fires that occurred in 2002, 2004 and 2006 had increased the AOD values greater than three. These increases showed a strong link to the decline in net radiation flux. The average decrease of net radiation flux at the event for Indonesia region ranged from -11.7 watt/m^2 to -13.6 watt/m^2 , with the largest decrease occurred in the surface. Average aerosol radiative forcing (ARF) for the top of atmosphere (ARF_{TOA}) was -0.5 watts/m^2 and for the surface (ARF_{surf}) was -17.7 watts/m^2 . The ARF represents the value that can be used as an indication of the potential climatic conditions in Indonesia in the future.

Keyword: AOD, aerosol radiative forcing, net radiation, the top of atmosphere, CERES, MODIS

ABSTRAK

Efek langsung aerosol terhadap *budget* radiasi di Indonesia telah dianalisis berdasarkan data fluks radiasi yang diperoleh dari instrumen *the Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) dan data ketebalan optik aerosol (AOD) dari *the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) - Terra. Neraca radiasi yang diperhitungkan termasuk radiasi gelombang pendek dan radiasi gelombang panjang. Data dengan periode waktu dari Maret 2000 sampai Februari 2010, diolah untuk dapat menganalisis pengaruh aerosol terhadap radiasi neto dan untuk memperoleh nilai *aerosol radiative forcing*. Nilai radiasi neto pada saat atmosfer tanpa aerosol, diestimasi dengan menggunakan metode *slope*. Hasil analisis menunjukkan adanya variasi temporal densitas aerosol yang tinggi di atmosfer dengan nilai $AOD_{maks} > 2,5$, yang pada umumnya menyebabkan penurunan fluks radiasi neto sehingga memberikan efek pendinginan. Pengaruh aerosol terhadap fluks radiasi neto dapat sangat jelas terlihat pada kasus kebakaran hutan. Kebakaran hutan yang terjadi pada 2002, 2004 dan 2006 telah meningkatkan nilai AOD lebih besar dari tiga. Peningkatan tersebut menunjukkan keterkaitan yang kuat terhadap penurunan fluks radiasi neto. Untuk rata-rata wilayah Indonesia penurunan fluks radiasi neto pada peristiwa tersebut adalah pada rentang $-11,7 \text{ watt/m}^2$ sampai $-13,6 \text{ watt/m}^2$, dengan penurunan terbesar terjadi di permukaan. Dari hasil perhitungan *Aerosol Radiative Forcing (ARF)* untuk rata-rata wilayah Indonesia diperoleh nilai *ARF* untuk level puncak atmosfer sebesar $-0,5 \text{ watt/m}^2$ (ARF_{TOA}) dan untuk level permukaan sebesar $-17,7 \text{ watt/m}^2$ (ARF_{surf}). *ARF* tersebut merupakan nilai yang dapat dijadikan sebagai indikasi dari potensi kondisi iklim di Indonesia pada masa mendatang.

Kata kunci: AOD, *aerosol radiative forcing*, radiasi neto, puncak atmosfer, CERES, MODIS,

1 PENDAHULUAN

Sumber utama energi untuk kehidupan di bumi berasal dari matahari yang masuk ke dalam sistem bumi yang didistribusikan ke semua lapisan atmosfer hingga sampai ke permukaan bumi (Kiehl dan Trenberth, 1997). Energi yang sampai bumi ini kemudian diemisikan kembali ke angkasa dengan panjang gelombang yang berbeda. Hasil dari proses tersebut dikenal sebagai *budget* radiasi bumi (*Earth's Radiation Budget*), yang berperan untuk mengatur dan mengendalikan kondisi keseimbangan iklim yang terjadi di bumi (Ramanathan, 1987; NASA, 2011).

Terkait dengan hal tersebut, Stanhill dan Cohen (2001) dan Ramanathan dkk (2005) melakukan penelitian terhadap radiasi matahari dari beberapa stasiun, dan menemukan pengurangan *budget* radiasi matahari yang cukup besar terjadi di permukaan dalam rentang waktu beberapa dekade. Pengurangan *budget* radiasi matahari

yang ditemukan adalah dalam rentang antara -2 watt/m^2 sampai -5 watt/m^2 untuk setiap dekadanya. Hal yang sama juga ditemukan oleh Wild dkk (2005) dari data satelit yang menunjukkan penurunan *budget* radiasi matahari di permukaan selama periode tahun 1960-1990, yang kemudian meningkat setelah periode tersebut. Kim dan Ramanathan (2008) menduga perubahan tersebut disebabkan oleh perubahan jumlah aerosol dan/atau awan.

Aerosol mempengaruhi *budget* radiasi matahari dan sistem iklim secara langsung dengan menghamburkan dan menyerap radiasi matahari yang masuk ke dalam sistem atmosfer bumi, dan secara tidak langsung aerosol mempengaruhi sistem iklim dengan memodifikasi distribusi ukuran tetes awan dan umur hidup awan (Penner, dkk, 2001), sehingga dapat menekan pemanasan yang diakibatkan oleh emisi gas-gas rumah kaca antropogenik (Boucher dan Haywood, 2001). Parameter AOD adalah parameter yang mengindikasikan

peredaman (*attenuation*) seberkas cahaya radiasi pada saat berkas cahaya radiasi tersebut melewati satu lapisan di atmosfer yang mengandung partikel aerosol (NASA, 2014; Huang, 2009). Peranan aerosol dalam sistem iklim dan neraca radiasi telah banyak dibahas oleh para peneliti, diantaranya Crutzen dan Andreae (1990), Ichoku dkk (2003), Keil dan Haywood (2003), Kaufman, dkk (2002) dan Breon, dkk (2002). Mereka mengungkapkan bahwa selama periode pada saat muatan aerosol sangat tinggi, maka keseimbangan *budget* radiasi matahari akan terganggu. Kaufman, dkk (2002) menegaskan bahwa akumulasi partikel aerosol yang terjadi di Samudera Hindia pada 1998-1999 berasal dari transportasi partikulat polutan yang diemisikan dari sub-benua India. Akumulasi partikel aerosol tersebut telah menyebabkan terjadinya pengurangan jumlah radiasi matahari yang sampai ke permukaan sebesar 15%.

Kondisi keseimbangan iklim dapat terganggu dengan adanya bahan *radiative forcing* (*radiative forcing agent*), yang berpotensi mengubah kondisi iklim. Partikel atau gas yang turut mempengaruhi perubahan iklim tersebut adalah aerosol, gas rumah kaca dan gas telusur (IPCC, 2007). Menurut Penner, dkk (2001), *radiative forcing* dari pengaruh langsung aerosol jauh lebih kompleks dibandingkan dengan *radiative forcing* yang disebabkan oleh gas rumah kaca. Benas dkk. (2011) telah mengamati dan menghitung *forcing* untuk wilayah Mediterranean, dengan menggunakan data klimatologi dari *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) dan model transfer radiasi. Hasil yang diperolehnya menunjukkan rata-rata bulanan aerosol *forcing* dari sumber antropogenik di permukaan mencapai nilai $ARF_{Surf} = -24 \text{ watt/m}^2$, di atmosfer $ARF_{Atm} = 19 \text{ watt/m}^2$, dan di level puncak atmosfer sebesar $ARF_{TOA} = -4 \text{ watt/m}^2$.

Pentingnya pengaruh aerosol pada sistem iklim dan neraca radiasi, menjadikan hal tersebut perlu dilakukan pendalaman. Namun, penelitian mengenai hal tersebut masih jarang untuk wilayah Indonesia.

Penelitian yang dilakukan penulis kali ini merupakan kelanjutan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Pada 2011, penulis telah menganalisis secara spasial dampak aerosol terhadap radiasi gelombang pendek (SW) yang dikaitkan dengan kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan dan Sumatera. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa kebakaran hutan yang terjadi 2002 dan 2006 di Kalimantan dan Sumatera, telah menyebabkan peningkatan nilai ketebalan optik aerosol (AOD) yang mencapai lebih dari 300% dari nilai rata-ratanya, dan menunjukkan keterkaitan yang kuat terhadap perubahan fluks radiasi gelombang pendek yang sampai di permukaan ($r > 0,8$) (Rosida dan Susanti, 2011). Penelitian berikutnya adalah tentang analisis pengaruh musiman secara spasial untuk fluks radiasi neto, fluks radiasi gelombang pendek (SW) dan fluks radiasi gelombang panjang (LW) di permukaan yang dikaitkan dengan perubahan secara spasial sebaran polutan karbon monoksida (CO) dan partikel aerosol yang diemisikan dari kebakaran hutan (Rosida dkk., 2014). Hasil analisisnya menunjukkan bahwa ada keterkaitan yang kuat antara tingginya nilai AOD yang rata-rata terjadi pada musim peralihan September-Oktober-November dengan pengurangan jumlah fluks radiasi neto baik di permukaan maupun di puncak atmosfer. Namun, dalam penelitian tersebut, digunakan perata-rataan nilai AOD yang 'meredam' adanya nilai-nilai ekstrem sebagai implikasi dari adanya kejadian-kejadian penting seperti kebakaran hutan, sehingga hasilnya kurang begitu dapat menunjukkan efek-

efek tertentu dari perubahan konsentrasi aerosol pada perubahan fluks radiasinya. Pada tahun yang sama Rosida dan Susanti (2014) juga menganalisis tren fluks radiasi neto, fluks radiasi SW dan fluks radiasi LW secara spasial di level puncak atmosfer pada kondisi cerah dan tidak cerah. Dari hasil analisisnya menunjukkan bahwa faktor antropogenik diperkirakan memberikan peranan yang cukup penting dalam mempengaruhi kesetimbangan budget radiasi. Peningkatan fluks radiasi neto SW yang terjadi di puncak atmosfer TOA, diikuti oleh penurunan fluks radiasi LW nya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh aerosol terhadap fluks radiasi neto di Indonesia pada level permukaan bumi yaitu pada level troposphere bawah pada ketinggian kira-kira di bawah 1 km dan pada level puncak atmosfer (*top of atmosphere* (TOA)) yaitu pada ketinggian sekitar 100 km dari atas permukaan Bumi (NASA, 2007; NOAA, 2016). Data fluks radiasi neto yang digunakan dalam penelitian ini adalah data anomalnya untuk memperoleh besarnya jumlah fluks radiasi akibat akumulasi partikel aerosol di atmosfer. Selain itu penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan *aerosol radiative forcing* untuk wilayah Indonesia. Seperti yang dijelaskan dalam laporan yang dirilis IPCC (2001) bahwa nilai positif *radiative forcing* digunakan untuk menyatakan kecenderungan yang menghangatkan permukaan Bumi dan nilai negatif digunakan untuk menunjukkan kecenderungan yang mendinginkan permukaan Bumi. Dengan diketahuinya besaran aerosol (dalam nilai AOD) dan *aerosol radiative forcing* diharapkan dapat dijadikan sebagai salah satu indikasi awal untuk mengetahui potensi perubahan kondisi iklim di wilayah Indonesia akibat emisi partikel aerosol yang terakumulasi dari kebakaran hutan.

2 METODOLOGI

2.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data ketebalan optik aerosol (AOD) dan data radiasi matahari. Terbatasnya data in situ terkait parameter AOD dan radiasi matahari tersebut menjadi alasan penggunaan data satelit dalam penelitian ini. Data yang digunakan berasal dari *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) level 3 (MOD08) untuk parameter AOD yang dapat diunduh dari ftp://ladsftp.nascom.nasa.gov/allData/6/MOD08_M3/. Untuk parameter radiasi matahari baik radiasi gelombang pendek maupun radiasi gelombang panjang diperoleh dari instrumen *The Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) yang dapat diunduh dari https://ceres.larc.nasa.gov/compare_products-ed2.php.

Penggunaan data MOD08 di dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan bahwa data AOD MOD08 menunjukkan validitas yang cukup baik apabila dibandingkan dengan data observasi AERONET (Chu dkk., 2002). MOD08 diturunkan dari statistik level 2 dan disimpan dalam ukuran grid yang sama. Ketidakpastian di atas daratan adalah $\Delta\tau = \pm 0,05 \pm 0,151 * AOD$ (Remer dkk., 2008; Levy dkk., 2010 dalam de Meij dkk., 2010).

Kedua data tersebut memiliki resolusi spasial 1 derajat dan resolusi temporal bulanan dari Maret 2000 sampai dengan Februari 2010. Lingkup wilayah yang dianalisis dalam penelitian ini dibatasi pada 6°LU-11°LS; 95°BT-141°BT.

Data fluks radiasi gelombang panjang dan gelombang pendek digunakan untuk menghitung fluks radiasi neto di permukaan dan di puncak atmosfer.

2.2 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, dianalisis efek radiatif aerosol dengan menggunakan 2 teknik analisis, yaitu pertama dengan menggunakan teknik deret waktu antara nilai maksimum AOD dengan nilai anomali fluks radiasi neto di puncak atmosfer dan di permukaan. Nilai AOD maksimum dipilih untuk mengidentifikasi nilai ekstrem nyata (tanpa proses perataan karena menyebabkan nilai ekstrem tidak terlihat) yang berpengaruh pada perubahan fluks radiasi neto yang juga tinggi.

Analisis efek aerosol terhadap perubahan fluks radiasi dilakukan untuk wilayah Indonesia (6°LU-11°LS; 95°BT-141°BT) guna melihat tren yang terjadi secara keseluruhan di wilayah Indonesia. Untuk menganalisis secara lokal, dilakukan *cropping* data dan dipilih zona Kalimantan (dalam batas 2°LU-3°LS dan 110°-116°BT), dan zona Sumatera (dalam batas 0,5° LU-6° LS dan 100°-106° BT), sebagai daerah yang sering menjadi sumber asap kebakaran yang berkontribusi pada peningkatan nilai AOD.

Korelasi yang digunakan dalam analisis untuk ketiga lokasi wilayah tersebut adalah korelasi spasial yang menjelaskan bahwa lokasi yang memiliki nilai AOD tinggi, akan memiliki nilai fluks radiasi neto yang rendah. Korelasi spasial dalam penelitian ini dihitung untuk setiap periode (tahunan dan bulanan). Hal tersebut dilakukan dengan maksud memperoleh keterkaitan antara nilai AOD dan fluks radiasi neto sebagai implikasi dari aerosol dalam mempengaruhi fluks radiasi neto terutama pada periode saat peristiwa terjadinya kebakaran hutan.

Kedua dengan menghitung nilai *aerosol radiative forcing* (ARF) di permukaan dan di puncak atmosfer. *Aerosol radiative forcing* yang akan dihitung adalah aerosol yang berpengaruh langsung pada fluks radiasi neto di

puncak atmosfer dan di permukaan. Untuk menghitung ARF dalam penelitian ini digunakan rumusan berdasarkan IPCC (2007), yang menyatakan bahwa ARF diperoleh berdasarkan perbedaan antara fluks radiasi neto pada kondisi bersih tanpa aerosol (F_{clean}) dengan fluks radiasi neto pada kondisi terpolusi oleh aerosol (F_{aer}), dengan rumusan sebagai berikut;

Untuk *aerosol radiative forcing* di puncak atmosfer (TOA):

$$ARF_{TOA} = F_{aer} (TOA) - F_{clean} (TOA) \quad (2-1)$$

$$ARF_{Surf} = F_{aer} (Surf) - F_{clean} (Surf) \quad (2-2)$$

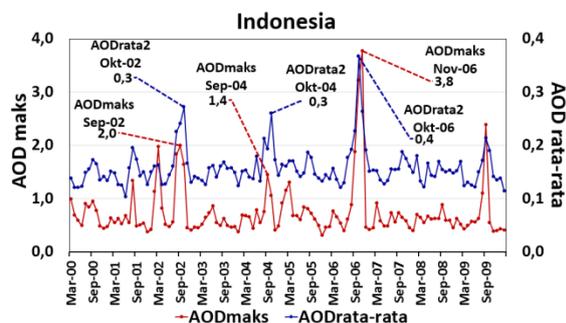
Untuk *aerosol radiative forcing* di permukaan:

ARF adalah *aerosol radiative forcing*, subskrip “*aer*” dan “*clean*” masing-masing menyatakan kondisi atmosfer yang terpolusi oleh adanya aerosol dan kondisi atmosfer yang tidak terpolusi aerosol. Jadi $F_{aer} (TOA)$ dan $F_{aer} (Surf)$ masing-masing adalah fluks radiasi neto di puncak atmosfer dan di permukaan pada kondisi terpolusi oleh aerosol. Berdasarkan persamaan (1) dan (2) diperlukan data fluks radiasi neto di puncak atmosfer dan di permukaan pada kondisi *clean* yang diasumsikan sebagai kondisi bersih dari aerosol (F_{clean}). Namun data F_{clean} ini tidak tersedia pada sensor CERES, dan untuk menentukannya digunakan nilai *intercept* yang ada dalam metode *slope* seperti yang digunakan oleh Rajeev dan Ramanathan (2001), Li dkk. (2004) dan Zengzhou dkk. (2011) yang menggunakan pendekatan metode *slope* untuk memperoleh nilai *intercept* yang digunakan untuk mengetahui kondisi radiasi pada kondisi cerah tanpa aerosol.

3 HASIL PEMBAHASAN

3.1 Analisis Deret Waktu Aerosol Optical Depth dan Anomali Fluks Radiasi Neto

Berdasarkan hasil pengolahan data diketahui bahwa nilai AOD sebagai indikasi konsentrasi aerosol di atmosfer, menunjukkan adanya variasi yang cukup tinggi, terutama untuk nilai maksimalnya. Pada periode yang sama terdapat grid yang menunjukkan nilai AOD yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai AOD rata-rata bulanannya, nilai tersebut adalah nilai AOD maksimum bulanan (AOD_{maks}). Pada Gambar 3-1 diperlihatkan perbedaan antara nilai AOD rata-rata bulanan dengan nilai AOD maksimum bulannya untuk seluruh grid Indonesia. Sebagai contoh data tahun 2006, nilai maksimum AOD dari rata-rata bulanan untuk seluruh grid wilayah Indonesia menunjukkan nilai 0,37. Sedangkan untuk AOD maksimum bulanan dari data riil nilainya mencapai 3,77.



Gambar 3-1: AOD rata-rata bulanan dari seluruh grid wilayah Indonesia dalam batas ($6^{\circ}LU-11^{\circ}LS$; $95^{\circ}BT-141^{\circ}BT$) dan AOD_{maks} bulanan dari data riil untuk batas wilayah Indonesia yang sama ($6^{\circ}LU-11^{\circ}LS$; $95^{\circ}BT-141^{\circ}BT$) dengan periode data dari Maret 2000 sampai Februari 2010

Perbedaan nilai tersebut terlalu besar. Hal tersebut terjadi karena nilai maksimum dari rata-rata spasial seluruh grid wilayah Indonesia adalah nilai perata-rataan dari banyak titik, sehingga nilai-nilai yang tinggi akan tersebar atau terbagi kenilai-nilai yang lainnya. Oleh sebab itu, nilai maksimum

dari rata-rata spasial seluruh grid wilayah Indonesia akan menyebabkan nilai ekstrem tidak terlihat. Selain itu nilai maksimum yang diperoleh dari perata-rataan seluruh grid wilayah Indonesia nilainya akan sangat kecil bila dibandingkan dengan nilai maksimum dari data riil tanpa proses perata-rataan.

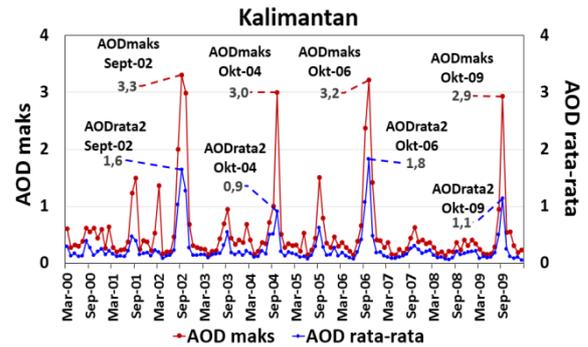
Selanjutnya penulis mencoba membandingkannya dalam lingkup yang lebih kecil. Perbedaan tersebut masih terlihat tetapi tidak sebesar seperti perbedaan yang dihasilkan dari perata-rataan spasial untuk seluruh grid wilayah Indonesia. Sebagai contoh digunakan data tahun yang sama 2006, dan dilakukan *cropping* pada zona Kalimantan ($2^{\circ}LU-3^{\circ}LS$ dan $110^{\circ}-116^{\circ}BT$). Hasilnya pada Gambar 3-2 menunjukkan nilai AOD maksimum bulannya sebesar 3,22 yang nilainya 2 kali lebih besar dari nilai AOD rata-rata bulannya sebesar 1,82. Adanya perbedaan tersebut, menunjukkan bahwa nilai rata-rata bulanan baik untuk rata-rata seluruh grid wilayah Indonesia maupun untuk lingkup yang lebih kecil, kurang dapat merefleksikan nilai ekstrem yang riil. Untuk itu dalam penelitian ini, penulis menggunakan nilai AOD maksimum bulanan untuk mendapatkan nilai AOD yang memberikan keterkaitan tertinggi terhadap perubahan fluks radiasi neto baik di permukaan maupun di puncak atmosfer.

Pada Gambar 3-3, ditunjukkan korelasi antara aerosol dalam nilai AOD_{maks} terhadap nilai anomali fluks radiasi neto di permukaan dan di puncak atmosfer untuk rata-rata spasial seluruh grid wilayah Indonesia. Dari grafik tersebut digambarkan bagaimana aerosol memberikan pengaruh pelemahan terhadap fluks radiasi neto di kedua tempat tersebut. Untuk nilai AOD_{maks} yang berfluktuasi pada rentang 0,3 sampai kira-kira 1,5, pada umumnya belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan fluks radiasi neto. Rentang perubahan fluks radiasi neto yang terjadi pada kondisi

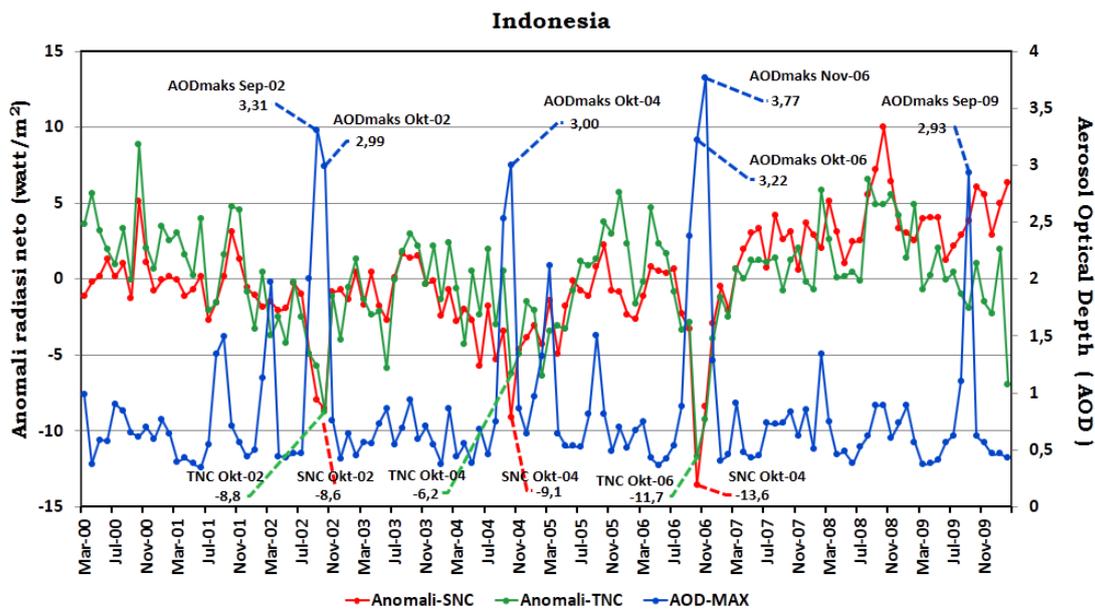
tersebut rata-rata berfluktuasi pada -5 watt/m² sampai 5 watt/m².

Pengaruh aerosol terhadap fluks radiasi neto yang cukup kuat terlihat pada kasus kebakaran hutan yang terjadi pada tahun 2002. Konsentrasi aerosol meningkat secara drastis dan dan mencapai puncaknya pada bulan September dengan nilai AOD_{maks} yang mencapai nilai tertinggi sebesar 3,31, nilai tersebut kemudian turun menjadi 2,99 pada Oktober. Kenaikan AOD_{maks} pada bulan September tersebut belum menunjukkan pengaruh yang optimum terhadap fluks radiasi neto, karena penurunan fluks radiasi neto masih terus berlangsung sampai bulan Oktober. Penurunan fluks radiasi neto terjadi saat itu sampai dengan $-8,6$ watt/m² di permukaan dan di puncak atmosfer sebesar $-8,8$ watt/m². Kasus yang terjadi pada peristiwa kebakaran hutan bulan Oktober 2004, cukup mempengaruhi pada peningkatan konsentrasi aerosol. Nilai AOD_{maks} yang tercatat saat itu mencapai nilai 3,0 yang cukup menunjukkan keterkaitannya terhadap penurunan fluks radiasi neto sebesar $9,11$ watt/m² di level

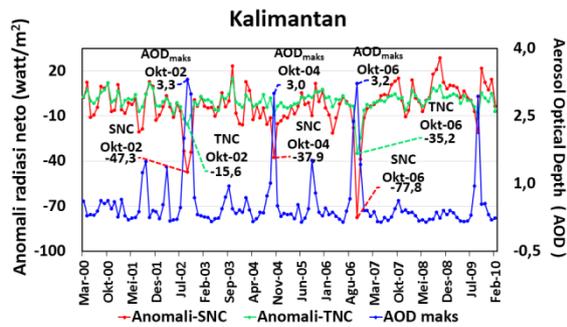
permukaan. Peningkatan konsentrasi aerosol pada peristiwa kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Oktober tahun 2006 telah meningkatkan nilai AOD_{maks} sampai dengan 3,22. Tingginya nilai AOD_{maks} yang terjadi menunjukkan korelasi spasial yang sangat tinggi ($r > 0,88$) terhadap penurunan fluks radiasi netonya baik di level permukaan maupun di level puncak atmosfer.



Gambar 3-2: AOD rata-rata bulanan dari seluruh grid wilayah Kalimantan dalam batas (2⁰LU–3⁰LS; 110⁰-116⁰BT) dan AOD_{maks} bulanan dari data riil untuk batas wilayah Kalimantan yang sama (2⁰LU–3⁰LS; 110⁰-116⁰BT) dengan periode data dari Maret 2000 sampai Februari 2010



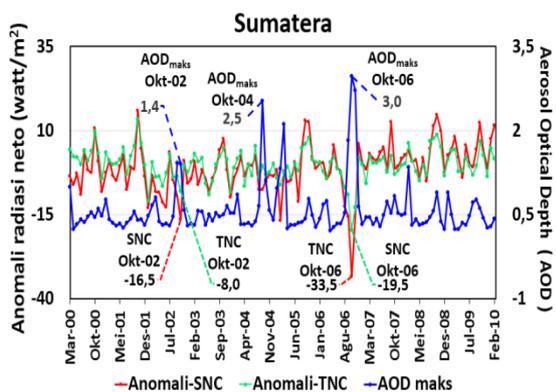
Gambar 3-3: Deret waktu nilai AOD_{maks} dengan anomali radiasi neto di puncak atmosfer (TNC) dan di permukaan (SNC) dalam watt/m² pada kondisi clear dari Maret 2000 sampai dengan Februari 2010 untuk wilayah Indonesia



Gambar 3-4: Deret waktu AOD_{maks} dan anomali radiasi neto di puncak atmosfer (TNC) dan di permukaan (SNC) dalam watt/m² dari Maret 2000 sampai dengan Februari 2010 untuk Kalimantan (2°LU–3°LS; 110°–116°BT)

Besarnya penurunan fluks radiasi yang terjadi di level permukaan adalah sebesar -13,6 watt/m² dan di level puncak atmosfer mencapai nilai -11,7 watt/m² (Gambar 3-3).

Sebagai perbandingan, penulis juga melakukan analisis dalam lingkup yang lebih kecil (zonasi) dalam area yang diperkirakan sering menjadi pusat terjadinya kebakaran hutan. Untuk Kalimantan analisis dilakukan pada batas area 2°LU–3°LS dan 110°–116°BT dan untuk Sumatera ditentukan batas area pada 0,5° LU–6° LS dan 100°–106° BT. Hasil menunjukkan hal yang hampir sama dengan yang diperoleh dari hasil analisis dalam skala Indonesia (Gambar 3-4 dan Gambar 3-5).



Gambar 3-5: Deret waktu AOD_{maks} dan anomali radiasi neto di puncak atmosfer (TNC) dan di permukaan (SNC) dalam watt/m² dari Maret 2000 sampai dengan Februari 2010 untuk Sumatera (0,5°LU–6°LS; 100°–106°BT)

Variasi temporal rata-rata bulanan dari nilai AOD_{maks} di kedua zonasi tersebut (Kalimantan dan Sumatera) juga menunjukkan variasi yang cukup tinggi. Peningkatan AOD_{maks} yang cukup signifikan, diduga berasal dari emisi kebakaran hutan yang terjadi di kedua zonasi tersebut. Seperti hasil analisis yang diperoleh dari seluruh grid rata-rata wilayah Indonesia, maka nilai AOD_{maks} yang berfluktuasi pada rentang antara 0,3 sampai kira-kira 1,5 pada umumnya dalam kedua zonasi tersebut juga belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap fluks radiasi netonya. Akan tetapi rentang dari perubahan anomali fluks radiasi neto pada ke 2 level ketinggian permukaan dan puncak atmosfer, rata-rata fluktuasinya menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan yang terjadi untuk rata-rata wilayah Indonesia yaitu terjadi pada rentang antara -15 watt/m² dan 15 watt/m². Pada rentang tersebut rata-rata penurunan fluks radiasi neto belum menunjukkan pengaruh yang kuat terhadap peningkatan konsentrasi aerosolnya.

Korelasi yang cukup kuat ditemukan pada peristiwa kebakaran yang terjadi pada tahun 2009 di Kalimantan. Peningkatan konsentrasi aerosol bulan September 2009 dengan nilai AOD_{maks} 2,9, menunjukkan korelasi spasial yang cukup tinggi ($r = 0,74$) terhadap penurunan radiasi netonya (Gambar 3-4). Di Sumatera hal yang sama terjadi pada bulan September 2004, peningkatan konsentrasi aerosol yang ditunjukkan oleh nilai AOD_{maks}nya sebesar 2,5 juga menunjukkan keterkaitan yang cukup kuat terhadap penurunan fluks radiasi netonya (Gambar 3-5). Korelasi tertinggi yang merefleksikan kondisi optimum, ditemukan pada zona Kalimantan dan Sumatera, yang pada umumnya terjadi di level permukaan, serta diperkirakan ada kaitannya dengan peristiwa

kebakaran hutan yang sangat besar yang terjadi saat itu.

Peristiwa kebakaran hutan pada bulan September 2002, telah menyebabkan tingginya akumulasi muatan aerosol di level permukaan pada zona Kalimantan yang diindikasikan oleh tingginya nilai AOD_{maks} yang mencapai nilai 3,3 (Gambar 3-4). Peningkatan muatan aerosol tersebut secara spasial berkorelasi sangat tinggi ($r=0,86$) terhadap pengurangan fluks radiasi neto sebesar $-47,3 \text{ watt/m}^2$.

Kondisi ekstrem ditemukan pada Oktober 2006 yaitu pada peristiwa kebakaran hutan yang lebih besar dibandingkan dengan yang terjadi pada 2002. Bahkan untuk zona Kalimantan, pengaruh dari kebakaran hutan pada Oktober 2006 tersebut, tidak hanya di level permukaan tapi juga pengaruhnya sampai pada level puncak atmosfer. Akumulasi muatan aerosol pada saat itu yang tercatat sebagai nilai AOD_{maks} adalah sebesar 3,2, yang telah menyebabkan penurunan fluks radiasi neto di permukaan sebesar $77,8 \text{ watt/m}^2$, dan di puncak atmosfer sebesar $35,2 \text{ watt/m}^2$. Korelasi dari pengaruh peningkatan muatan aerosol terhadap penurunan fluks radiasi netonya tersebut, baik untuk level permukaan maupun untuk level puncak atmosfer, masing-masing menunjukkan korelasi yang sangat tinggi yaitu $r = 0,99$ untuk level permukaan dan $0,98$ untuk level puncak atmosfer. Kondisi ekstrem di zona Sumatera, pada peristiwa kebakaran hutan Oktober 2006 tersebut, hanya mempengaruhi pada level permukaan. Akumulasi aerosol yang terjadi saat itu meningkatkan nilai AOD_{maks} menjadi 2,9 dan berpengaruh terhadap penurunan fluks radiasi neto sampai dengan $-33,5 \text{ watt/m}^2$ dengan nilai korelasi $r = 0,85$.

Berdasarkan penjelasan beberapa peneliti seperti Li dkk. (2007), Korhonen dkk. (2008) dan Boucher dkk. (2013) bahwa respon radiasi yang berbeda-beda

terhadap besaran AOD sangat tergantung pada komposisi kimia aerosol, jenis, distribusi ukuran setiap partikel yang menyebabkan daya refleksi dan daya absorpsi yang berbeda-beda. Menurut Keil dan Haywood (2003) perbedaan-perbedaan tersebut sangat menentukan sifat refraktif aerosol terhadap fluks radiasi yang secara keseluruhan karakteristik aerosol tersebut biasanya berkorelasi sangat tinggi dengan sumbernya (Keil dan Haywood, 2003). Selain itu perbedaan besaran nilai anomali di permukaan dan di puncak atmosfer, menurut Penner dkk. (2001) dimungkinkan karena pengaruh gas rumah kaca yang menjadi 'amplifier' bagi gelombang panjang, dan karena hanya sebagian kecil dari gelombang panjang yang berhasil mencapai puncak atmosfer. Sebagai akibatnya, akumulasi radiasi di permukaan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan di puncak atmosfer (Penner dkk., 2001). Selain itu, dalam rata-rata Indonesia karakter lautan cukup mendominasi, dan mempengaruhi nilai rata-rata radiasi maupun AODnya. Sementara dalam zonasi Kalimantan dan Sumatera lebih didominasi oleh daratan. Dengan adanya perbedaan karakteristik tersebut penulis menduga bahwa respon lautan dan daratan terhadap radiasi, serta variasi sumber-sumber aerosol, antara rata-rata Indonesia dan rata-rata zonasi akan menunjukkan perbedaan yang cukup besar. Hal tersebut sangat menarik yang perlu dilakukan penelitian lebih mendalam untuk dapat mem-buktikannya.

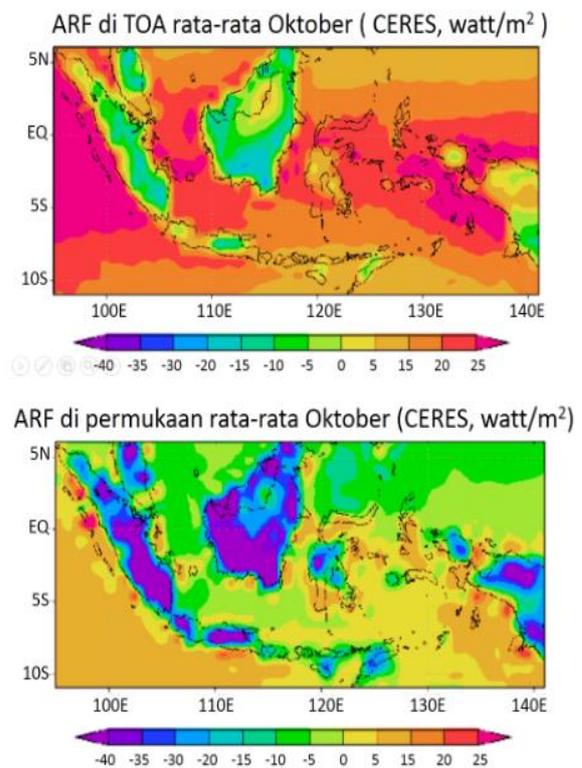
Kebakaran hutan di Kalimantan dan Sumatera hampir terjadi di setiap tahun. Menurut laporan pengendalian kebakaran hutan dan lahan tercatat bahwa sejak 2000 sampai 2008 telah terjadi kebakaran hutan yang banyak menimbulkan dampak seperti asap yang selain mencemari lingkungan juga sangat mengganggu kesehatan (KLH, 2006; BPDLD, 2009; Susanto, 2015). Terkait dengan hal tersebut, penulis

menduga bahwa akumulasi partikel aerosol adalah berasal dari emisi kebakaran hutan gambut di Sumatera dan Kalimantan. Rosida dan Susanti (2014) juga menemukan bahwa densitas akumulasi aerosol dengan nilai $AOD_{maks} > 3$ mempengaruhi fluks radiasi neto sampai ke level puncak atmosfer. Dari analisis secara spasial pengurangan jumlah fluks radiasi neto yang terjadi di permukaan mencapai nilai sampai dengan 100 watt/m^2 . Di level puncak atmosfer besarnya pengurangan fluks radiasi neto adalah sebesar $\sim 15 \text{ watt/m}^2$. Sangat berbeda dengan hasil penelitian Benas dkk. (2011) di wilayah Mediterranean yang kondisi lingkungannya sangat terpolusi. Akumulasi partikel aerosol yang menutupi wilayah Mediterranean ini adalah berasal dari polutan debu. Sementara dalam penelitian ini, partikel aerosol yang diamati adalah berasal dari kebakaran hutan gambut di Kalimantan dan Sumatera. Benas dkk. (2011) menjelaskan bahwa akumulasi partikel debu aerosol telah menyebabkan pendinginan di permukaan akibat pengurangan radiasi yang mencapai nilai 215 watt/m^2 , dan pengurangan radiasi yang terjadi di level atmosfer atas yang mencapai 46 watt/m^2 . Perbedaan tersebut memperkuat penjelasan Keil dan Haywood (2003) dan Penner dkk. (2001) bahwa dalam hal ini karakteristik partikel aerosol sangat berperan. Kaufman dkk. (2002) juga menjelaskan bahwa massa aerosol, komposisi kimia aerosol dan jumlah partikel aerosol yang sangat bervariasi terhadap ruang dan waktu, juga sangat berperan dalam mempengaruhi fluks radiasi yang sampai di puncak atmosfer maupun dipermukaan.

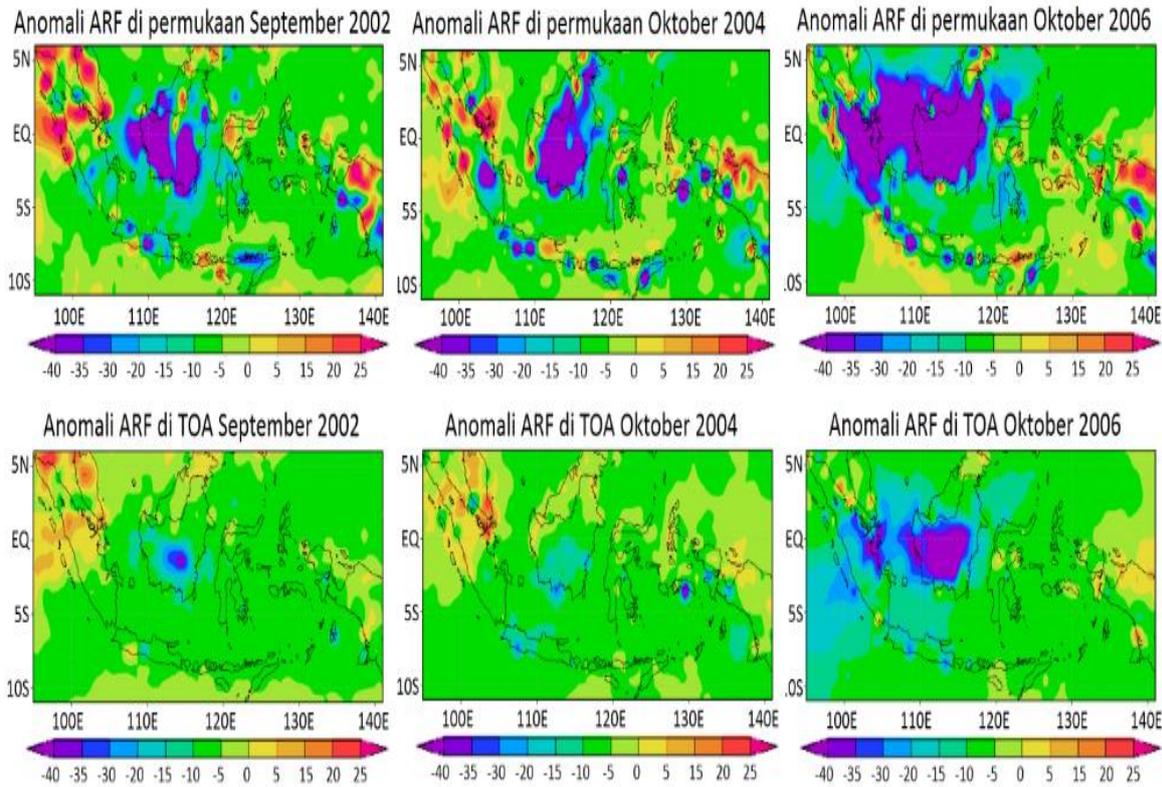
3.2 Analisis direct radiative forcing aerosol (ARF)

Determinasi forcing untuk pengaruh langsung aerosol dihitung berdasarkan perbedaan radiasi neto pada kondisi terpolusi oleh aerosol dan radiasi neto pada kondisi tanpa adanya

aerosol (kondisi bersih). Dengan menggunakan persamaan (2-1) dan (2-2), dihitung ARF nya untuk level puncak atmosfer dan permukaan. Data fluks radiasi neto pada kondisi terpolusi (F_{aer}) diperoleh dari satelit Aqua-CERES, dan untuk nilai fluks radiasi neto pada kondisi bersih (F_{clean}) diestimasi dari nilai *intercept*-nya dengan metode *slope*. Fluks radiasi neto pada kondisi terpolusi (F_{aer}) merupakan rata-rata dari total data di level puncak atmosfer, dan dari hasil perhitungan nilainya sama dengan 91,35. Untuk F_{aer} di permukaan adalah juga dihitung dari rata-rata total data fluks radiasi neto di permukaan dan diperoleh nilai 207,89. Dari hasil perhitungan dengan persamaan regresi linear, diasumsikan aerosol (yang dalam hal ini adalah nilai AOD) adalah = nol, maka *intercept* yang diperoleh adalah fluks radiasi neto pada kondisi bersih (F_{clean}). Nilai *intercept* F_{clean} yang diperoleh untuk level puncak atmosfer adalah 91,83, dan F_{clean} untuk level permukaan diperoleh nilai 225,6.



Gambar 3-6: Pola spasial Aerosol Radiative Forcing di puncak atmosfer (ARF_{TOA}) dan permukaan (ARF_{Surf}) pada bulan Oktober, dalam satuan watt/m^2



Gambar 3-7: Anomali ARF di level permukaan dan di TOA pada bulan Oktober 2002, 2004 dan 2006

Dengan menggunakan persamaan (2-1) dan (2-2) diperoleh ARF , untuk rata-rata di level puncak atmosfer ARF_{TOA} adalah $-0,5 \text{ watt/m}^2$ dan untuk level permukaan ARF_{Surf} adalah $-17,7 \text{ watt/m}^2$. Hasil ini sedikit berbeda dengan hasil yang diperoleh Abel dkk. (2005) yang menghitung *aerosol radiative forcing* (ARF) dari partikel aerosol yang berasal dari emisi pembakaran biomassa di Afrika bagian Selatan. Abel dkk. (2005) menggunakan model transfer radiasi untuk menghitung ARF nya dan diperoleh hasilnya untuk level puncak atmosfer dengan rentang ARF_{TOA} pada $-7,6 \text{ watt/m}^2$ sampai $-9,1 \text{ watt/m}^2$, dan untuk ARF_{Surf} pada rentang $-18,1 \text{ watt/m}^2$ sampai $-21,4 \text{ watt/m}^2$. Selain itu dari perhitungan Benas dkk. (2011), ARF di wilayah Mediterranean, suatu wilayah

dengan kondisi yang sangat terpolusi oleh partikel debu, menunjukkan ARF di level puncak atmosfer ARF_{TOA} sebesar -4 watt/m^2 dan di level permukaan ARF_{Surf} adalah sebesar -24 watt/m^2 . Abel, dkk. (2005) menjelaskan bahwa selain karakteristik partikel aerosol yang sangat kompleks dan rumit, termasuk albedo permukaan yang mempengaruhi efek radiasi langsung aerosol, maka perbedaan karakteristik permukaan tanah juga merupakan hal yang sangat penting untuk dipertimbangkan.

Estimasi ARF dari hasil perhitungan memperlihatkan bahwa perubahan-perubahan yang terjadi baik di level puncak atmosfer maupun di permukaan diduga banyak dipengaruhi oleh pergerakan semua sumber energi radiasi matahari. Tapi untuk level permukaan, selain pengaruh tersebut,

diperkirakan aktivitas manusia menunjukkan peran yang lebih mendominasi. Akumulasi partikel aerosol dari emisi kebakaran hutan gambut di Sumatera dan Kalimantan sama-sama menunjukkan ARF dengan nilai negatif baik untuk permukaan maupun untuk level puncak atmosfer. Pada kedua level terjadi pendinginan dengan perbedaan nilai yang cukup signifikan. Di level puncak atmosfer akumulasi yang terjadi menyebabkan pendinginan dengan pengurangan fluks radiasi antara 5 watt/m^2 sampai 20 watt/m^2 , seperti ditunjukkan pada Gambar 3-6 dengan perubahan luasan spasial berwarna hijau sampai warna biru muda. Sementara di level permukaan pendinginan terjadi dengan berkurangnya fluks radiasi neto yang sangat signifikan yaitu $>40 \text{ watt/m}^2$, pada gambar indikasi perubahannya diperlihatkan oleh perubahan luasan warna biru tua sampai ungu tua.

Dalam beberapa kasus pengaruh antropogenik juga dapat mencapai level puncak atmosfer dan mempengaruhi level puncak atmosfer itu sendiri. Seperti peristiwa kebakaran hutan gambut yang terjadi pada 2002 dan 2006 (Gambar 3-7). Dari hasil analisis musiman maka peristiwa kebakaran hutan yang terjadi pada musim SON tahun 2002, 2004 dan 2006, maka kontribusi kebakaran hutan yang terjadi pada periode SON tahun 2006 merupakan peristiwa terbesar yang pernah terjadi. Dispersi partikel aerosolnya sampai mencapai ketinggian level puncak atmosfer. Gambar 3-7 memperlihatkan perbandingan ARF dalam nilai anomalnya yang terjadi di permukaan dan di level puncak atmosfer. Secara spasial dipresentasikan bahwa pada umumnya pengaruh distribusi aerosol lebih mendominasi pada level permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa aktifitas antropogenik yang terjadi dipermukaan

memberikan peranan yang sangat besar dalam mempengaruhi fluks radiasi neto.

4 KESIMPULAN

Dari analisis variasi temporal untuk rata-rata wilayah Indonesia, pengaruh aerosol terhadap fluks radiasi neto dapat sangat jelas terlihat pada kasus kebakaran hutan. Pada umumnya konsentrasi dari akumulasi muatan aerosol yang tinggi di atmosfer yang diindikasikan oleh tingginya nilai $AOD_{maks} > 2,5$ memberikan efek pendinginan yang dipresentasikan oleh penurunan fluks radiasi netonya.

Pada peristiwa kebakaran hutan yang sangat besar pada 2006, konsentrasi dari akumulasi aerosol untuk rata-rata wilayah Indonesia meningkat dan terjadi pada Oktober 2006. Peningkatan nilai AOD_{maks} saat itu mencapai 3,2 dan berkorelasi tinggi ($r \geq 0,88$) terhadap penurunan fluks radiasi neto di permukaan sebesar $13,6 \text{ watt/m}^2$, dan di puncak atmosfer sebesar $11,7 \text{ watt/m}^2$.

Kondisi ekstrem lebih terlihat jelas dalam lingkup skala yang lebih kecil yaitu pada zona Kalimantan dan Sumatera. Sebagai sumber kebakaran hutan yang terbesar, akumulasi muatan aerosol yang terjadi di zona Kalimantan 2006, telah menyebabkan penurunan fluks radiasi neto yang terbesar di zona tersebut. Peningkatan AOD_{maks} yang terjadi saat itu mencapai lebih besar dari 3,2 dan menunjukkan korelasi yang lebih tinggi dengan $r \geq 0,98$ terhadap penurunan fluks radiasi neto di level permukaan sampai sebesar $77,8 \text{ watt/m}^2$, dan di puncak atmosfer sebesar $35,2 \text{ watt/m}^2$. Akumulasi muatan aerosol tersebut di zona Sumatera hanya berpengaruh pada level permukaan dengan penurunan fluks radiasi neto yang mencapai sebesar $33,5 \text{ watt/m}^2$.

Dari penentuan *forcing* aerosol, efek langsung aerosol terhadap fluks

radiasi neto menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara *aerosol radiative forcing (ARF)* di permukaan dan di puncak atmosfer. Dari perhitungan rata-rata total data yaitu dari Maret 2000 sampai Februari 2010, untuk rata-rata wilayah Indonesia, diperoleh *aerosol radiative forcing* di permukaan (ARF_{Surf}) adalah $-17,7 \text{ watt/m}^2$, dan di puncak atmosfer (ARF_{TOA}) adalah $-0,5 \text{ watt/m}^2$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian yang dilaksanakan dan didanai oleh Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN Bandung. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih Kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN Bandung yang telah memberikan dukungannya. Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), yang telah menyediakan data yang sangat bermanfaat. Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan terutama kepada bapak Drs. Sri Kaloka Prabotosari yang telah banyak sekali memberikan masukan-masukan yang sangat berharga.

DAFTAR RUJUKAN

Abel, S.J., E. J. Highwood, J. M. Haywood, and M. A. Stringer, 2005. *The Direct Radiative Effect of Biomass Burning Aerosols Over Southern Africa*. Atmos. Chem. Phys., 5, 1999–2018.

Benas, N., N. Hatzianastassiou, C. Matsoukas, A. Fotiadi, N. Mihalopoulos, and I. Vardavas, 2011. *Aerosol Shortwave Direct Radiative Effect and Forcing Based on MODIS Level 2 Data in the Eastern Mediterranean (Crete)*. Atmos. Chem. Phys., 11, 12647–12662, doi: 10.5194/acp-11-12647- 2011.

Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, et al., 2013. *Clouds and Aerosols*. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauelss, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.016.

Boucher, O., and J., Haywood, 2001. *On Summing the Components of Radiative Forcing of Climate Change*. Clim. Dyn., 18, 297–302.

BPDDL, 2009. *Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Daerah-Kota Palangkaraya*. UPT Laboratorium Lingkungan, 2009.

Breon, F. M., D., Tanre, and S., Generoso, 2002. *Aerosols Effect on the Cloud Droplet Size Monitored from Satellite*. Science, 295, 834–838.

Chu, D.A., Y.J. Kaufman, C., Ichoku, L.A. Remer, D., Tanre, B.N. Holben, 2002. *Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land*. Geophysical Research Letter, Vol. 29, No.12, doi:10.1029/2001GL 013205.

Crutzen, P. J., and M.O., Andreae, 1990. *Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles*. Science, 250, 1669–1678.

de Meij, A., A., Pozzer, J., Lelieveld, 2010. *Global and Regional Trends in Aerosol Optical Depth Based on Remote Sensing Products and Pollutant Emission Estimates Between 2000 And 2009*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 10, 30731–30776, doi:10.5194/acpd-10-30731- 2010.

Huang, H., 2009. *Aerosol Remote Sensing Using AATSR*, Postdoctoral Dissertation, Atmospheric, Oceanic and Planetary

- Physics, Department of Physics, University of Oxford, 64.
- Ichoku, C., L.A. Remer, Y.J. Kaufman, R. Levy, D.A. Chu, D. Tanré, and B.N. Holben, 2003. *MODIS Observations of Aerosols and Estimation of Aerosol Radiative Forcing Over Southern Africa During SAFARI 2000*. J. Geophys. Res., 108, 8499, doi:10.1029/2002JD002366.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881.
- Kaufman, Y.J., D. Tanré and O. Boucher, 2002. *A Satellite View of Aerosols in the Climate System*. Nature, 419, 215–223.
- Keil, A., and J.M. Haywood, 2003. *Solar Radiative Forcing by Biomass Burning Aerosol Particles During SAFARI 2000: A Case Study Based on Measured Aerosol and Cloud Properties*. J. Geophys. Res., 108, 8467, doi:10.1029/2002JD 002315.
- Kiehl, J.T., and K.E., Trenberth, 1997. *Earth Annual Global Mean Energy Budget*, Bulletin of the American Meteorological Association, 78, 197-208.
- Kim, D.Y., and V. Ramanathan, 2008: *Solar Radiation Budget and Radiative Forcing Due to Aerosols and Clouds*. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 113.
- KLH, 2006. *Press Release Pengendalian Kebakaran Hutan Dan Lahan*, Kementerian Lingkungan Hidup, Republik Indonesia, 1 September 2006, diunduh pada 30 November 2006 dari <http://www.menlh.go.id/press-release-pengendalian-kebakaran-an-hutan-dan-lahan-kementerian-lingkungan-hidup/>.
- Korhonen, H., K. S., Carslaw, D. V., Spracklen, D. A., Ridley, and J., Ström, 2008. *A Global Model Study of Processes Controlling Aerosol Size Distributions in the Arctic Spring and Summer*, J. Geophys. Res., 113, D08211, doi:10.1029/2007JD009114.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Kleidman, R. G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., and Eck, T.F., 2010. *Global Evaluation of the Collection 5 MODIS Dark-Target Aerosol Products Over Land*, Atmos. Chem. Phys., 10, 10399–10420, doi:10.5194/acp-10-10399-2010.
- Li, Z., X. Xia, M. Cribb, W. Mi, B. Holben, P. Wang, H. Chen, S.C. Tsay, T. F. Eck, F. Zhao, E. G. Dutton, R. E. Dickerson, 2007. *Aerosol Optical Properties and their Radiative Effects in Northern China*, J. Geophys. Res.112, D22S01, doi:10.1029/2006JD007382.
- Li, F., A. M., Vogelmann, V., Ramanathan, 2004. *Saharan Dust Aerosol Radiative Forcing Measured from Space*. Journal Of Climate, Vol. 17, 2558-2571.
- NASA, 2014. *Aerosol Optical Thickness*, GES – DISC (Goddard Earth Sciences Data and Informations Services Center), Programme Informations Pages, diunduh pada 12 September 2014 dari http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/aerosol_optical_thickness_or_depth.shtml.
- NASA, 2011. *What is the Earth's Radiation Budget?*. Science Education Resources, diunduh pada tanggal 28 Juni 2011 dari <https://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/whatis.html>.

- NASA, 2007. *The Top of Atmosphere, Earth Observatory*, diunduh pada tanggal 3 Februari 2007 dari [http:// earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7373](http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7373).
- NOAA, 2016. *Layers of the Atmosphere, National Weather Service*, diunduh pada tanggal 6 Mei 2016 dari <http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/layers.html>.
- Penner, J., M. Andreae, H. Annegarn, L. Barrie, J. Feichter, D. Hegg, A. Jayaraman, R. Leaitch, D. Murphy, J. Nganga, and G. Pitari., 2001. *Aerosols, their Direct and Indirect Effects*. In *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contributing of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 289-348.
- Rajeev, K., and V. Ramanathan, 2001. *Direct Observations of Clear-Sky Aerosol Radiative Forcing from Space During the Indian Ocean Experiment*. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 106 , NO. D15, 17221–17235.
- Ramanathan, V., C. Chung, D. Kim, T. Bettge, L., Buja, J. T., Kiehl, W. M., Washington, Q., Fu, D. R., Sikka, and M., Wild, 2005. *Atmospheric Brown Clouds: Impacts on South Asian Climate and Hydrological Cycle*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 102, 5326–5333.
- Ramanathan, V., 1987. *The Role of Earth radiation Budget in Climate and General Circulation Research*, *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D4, 4075-4095.
- Remer, L. A., Kleidman, R. G., Levy, R. C., Kaufman, Y. J., Tanre, D., Mattoo, S., Martins, J.V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H., and Holben, B. N., 2008. *Global Aerosol Climatology from the MODIS Satellite Sensors*, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2007JD009661, 2008.
- Rosida, I., Susanti, dan W.E., Cahyono, 2014. *Analisis Dampak Kebakaran Hutan Terhadap Kesetimbangan Radiasi di Permukaan Menggunakan Data CERES*, *Prosiding Seminar Sains Atmosfer 2014*, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, LAPAN, ISBN: 978-979-1458-84-9, 418-431.
- Rosida, dan I., Susanti, 2014. *Analisis Spasial Perubahan Radiasi di Top of Atmosphere (TOA), Kualitas Udara dan Komposisi Atmosfer Indonesia*, Buku2 – PSTA 2014, Penerbit Adira, ISBN: 978-979-1458-82-5, 89-99.
- Rosida dan I. Susanti, 2011. *Spatial Analysis of Atmospheric Aerosol Impact on Shortwave Radiation over Indonesia*, *International Symposium on the 10th Anniversary of the Equatorial Atmospheric Radar (EAR)*, ISBN: 978-979-1458-52-8, 231-239.
- Stanhill, G., and S. Cohen, 2001. *Global Dimming: a Review of the Evidence for a Widespread and Significant Reduction in Global Radiation with Discussion of its Probable Causes and Possible Agricultural Consequences*, *Agric. For. Meteorology*, 107, 255– 278.
- Susanto A., 2015. *Apa yang Paling Banyak Menyebabkan Kebakaran Hutan di Indonesia?*, diunduh pada tanggal 11 Oktober 2015 dari [http:// www.rappler.com/indonesia/104764-kebakaran-hutan-indonesia-cifor](http://www.rappler.com/indonesia/104764-kebakaran-hutan-indonesia-cifor).
- Wild, M., H. Gilgen, A., Roesch, A., Ohmura, C., Long, E., Dutton, B., Forgan, A., Kallis, V., Russak, and A., Tsvetkov, 2005. *From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at the Earth's Surface*, *Science*, 308, 847–850.
- Zengzhou, H., P., Delu, and G., Fang, 2011. *Aerosol Direct Radiative Forcing at the Top of Atmosphere Based on Satellite*

Remote Sensing Over China Seas: A Preliminary Study, Remote Sensing of the Environment: The 17th China

Conference on Remote Sensing, Proceedings of SPIE Vol. 8203, doi: 10.1117/12.910433.