

# KARAKTERISTIK AEROSOL DAN *RADIATIVE FORCING* SELAMA PRA-MONSUN DAN PASCA MONSUN ASIA DI INDONESIA

## *AEROSOL AND RADIATIVE FORCING CHARACTERISTIC DURING ASIA PRE-MONSOON AND POST-MONSOON OVER INDONESIA*

Indah Susanti, Rosida, Waluyo Eko Cahyono, dan Nani Cholianawati  
PSTA – LAPAN Bandung  
Jl. Djundjuran 133 Bandung 40173  
Pos-el: [indahpl@gmail.com](mailto:indahpl@gmail.com)

### **ABSTRACT**

*This paper describes radiative characteristics of aerosol using MODIS data and CERES for pre-monsoon period (March, April and May) and post-monsoon (September, October and November) on Indonesia. The period of data used from March 2000 to December 2011. In the analysis performed two different scope, the scope Indonesia (20°LS-20°LU, 80°-150°BT) dan scope of Kalimantan (3°LS-2°LU, 110°-115°BT). Data Aerosol optical depth (AOD) from MODIS shows the difference in value between the pre and post monsoon to both the scope of the study. The average value of AOD to the scope Indonesia is in the pre monsoon 0.152 and 0.175 in the pre-monsoon. As for the scope of Kalimantan, the average value of AOD is 0.134 in the pre monsoon and post-monsoon 0.366 in the period. AOD values were higher during the post-monsoon generally produced from the pollutant load of fire. By using the slope method can be obtained information that the cooling effect occurred greater in the post-monsoon period, the ARF value of -20.11 for the case of the scope of Kalimantan, and -5.38 for the scope of the case of Indonesia. In the pre-monsoon period, ARF-value of 3.57 for scope Indonesia and -5.38 for the scope of Kalimantan. In addition, the post-monsoon period indicates that aerosols have a higher effectiveness in influencing the net radiation at the surface.*

*Keywords: ARF, AOD, heating, cooling, monsoon.*

### **ABSTRAK**

Makalah ini menjelaskan karakteristik radiatif aerosol dengan menggunakan data MODIS dan CERES untuk periode pra-monsoon (Maret, April dan Mei) dan pasca monsun (September, Oktober dan November) di atas Indonesia. Periode data yang digunakan dari Maret 2000- Desember 2011. Dalam analisisnya dilakukan 2 lingkup yang berbeda, yaitu lingkup Indonesia (20°LS-20°LU, 80°-150°BT) dan lingkup Kalimantan (3°LS-2°LU, 110°-115°BT). Data *Aerosol optical depth* (AOD) dari MODIS menunjukkan perbedaan nilai antara pra dan pasca monsun untuk kedua lingkup kajian. Rata-rata nilai AOD untuk lingkup Indonesia adalah 0,152 pada pra monsun dan 0,175 pada pra monsun. Sedangkan untuk lingkup Kalimantan, nilai rata-rata AOD adalah 0,134 pada periode pra monsun dan 0,366 pada periode pasca monsun. Nilai AOD yang lebih tinggi selama pasca monsun pada umumnya dihasilkan dari beban polutan kebakaran. Dengan menggunakan *slope method* dapat diperoleh informasi bahwa efek pendinginan yang terjadi lebih besar terjadi pada periode pasca monsun, dengan nilai ARF sebesar -20,11 untuk kasus lingkup Kalimantan, dan -5,38 untuk kasus lingkup Indonesia. Pada periode pra monsun, ARF bernilai 3,57 untuk lingkup Indonesia dan -5,38 untuk lingkup Kalimantan. Selain itu, pada periode pasca monsun menunjukkan bahwa aerosol memiliki efektivitas yang lebih tinggi dalam mempengaruhi radiasi netto di permukaan.

Kata kunci : ARF, AOD, pemanasan, pendinginan, monsun.

### **PENDAHULUAN**

Aerosol merupakan salah satu komponen penting dalam komposisi atmosfer. Banyak ahli telah melakukan penelitian terkait dengan aerosol dan interaksinya dengan iklim, diantaranya adalah Menon<sup>1</sup>, Lou<sup>2</sup>, Hansen<sup>3</sup> dan Ramanathan.<sup>4</sup> Mereka menyatakan bahwa aerosol menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap keseimbangan energi di atmosfer dan di

permukaan bumi, sehingga memodulasi siklus hidrologi. Interaksi aerosol dan siklus hidrologi, baik global maupun regional, merupakan hal yang kompleks. Hal ini karena adanya pengaruh dari berbagai variabel yang mengontrol sumber dan transportasi aerosol, perbedaan karakteristik fisis dan kimiawi aerosol serta umpan balik yang mungkin terjadi terhadap sirkulasi umum atmosfer.

Aerosol memencarkan dan/atau menyerap radiasi sinar matahari, sehingga memberi efek pendinginan terhadap permukaan, yang dikenal sebagai efek langsung dari aerosol terhadap iklim. Reduksi radiasi sinar matahari pada permukaan sering disebut sebagai efek “*solar dimming*”. *Solar dimming* tersebut dapat meluas secara global yang disebabkan adanya perbedaan distribusi sumber-sumber aerosol alami dan antropogenik berdasarkan ruang dan waktu, serta transpor jarak jauh partikel aerosol berukuran kecil.<sup>5</sup> Pendinginan permukaan dari adanya *solar dimming*, dapat menstabilkan troposfer bawah dan membatasi konveksi, karena permukaan bumi mendingin dalam kuantitas yang lebih besar daripada pendinginan atmosfer di atasnya.<sup>6</sup>

Cara lain aerosol dapat mempengaruhi siklus air adalah melalui interaksinya dengan proses-proses mikrofisika awan, dimana peningkatan aerosol yang bertindak sebagai *cloud condensation nuclei* (CCN), menyebabkan pembentukan droplet air yang lebih kecil dengan jumlah yang lebih banyak dan meningkatkan pemencaran, meningkatkan albedo awan, dan memantulkan radiasi sinar matahari lebih banyak, semua ini disebut sebagai efek tidak langsung yang pertama.<sup>7</sup> Droplet kecil membatasi kolisi dan koalesensi, memperpanjang waktu tinggal awan dan menghambat tetes awan menjadi tetes hujan. Hal ini merupakan efek tidak langsung yang kedua.<sup>8</sup> Hal ini mengakibatkan awan yang terbentuk menjadi lebih banyak dan meningkatkan pantulan radiasi sinar matahari, serta pendinginan yang lebih banyak terhadap permukaan bumi. Terdapat kemungkinan lain mengenai hal tersebut, yaitu bahwa dalam lingkungan atmosfer terjadi peningkatan kelembaban dan gaya apung (*buoyansi*), peningkatan aerosol higroskopik yang dapat mengaktivasi CCN lebih banyak dan mempercepat pertumbuhan melalui proses difusi dan kolisi, yang pada akhirnya meningkatkan curah hujan.<sup>9</sup>

Presipitasi global merupakan komponen utama bagi siklus air dan energi global yang mempengaruhi sistem iklim bumi secara global. Aerosol diketahui memberikan dampak pada pembentukan dan siklus awan. Sejumlah pengukuran menunjukkan bahwa aerosol antropogenik seringkali mengubah awan dan karakteristik optiknya.<sup>10</sup> Aerosol dapat dihasilkan oleh alam dan oleh aktivitas manusia. Percampuran aerosol dari berbagai sumber dapat menghasilkan komposit zat kimia yang berbeda, yang menentukan indeks refraktif aerosol.<sup>11</sup> Pada akhir-akhir ini, di antara negara-negara monsun

Asia seperti India dan Cina, persoalan aerosol menjadi persoalan yang akut karena peningkatan beban polutan atmosfer berhubungan dengan cepatnya industrialisasi dan modernisasi, terutama di kota-kota besar. Di sisi lain, pembangunan berkelanjutan di negara-negara yang mengalami monsun Asia tergantung pada keberaturan monsun, yang mensuplay kebutuhan air untuk hampir seluruh wilayah. Penemuan penelitian kontemporer telah mendorong kepedulian yang lebih banyak mengenai efek potensial *aerosol radiative forcing* pada besarnya fluktuasi hujan monsun India dan sirkulasi beberapa tahun terakhir.

Sampai saat ini, kebanyakan studi mengenai aerosol lebih berfokus pada aspek radiatif, mikrofisis, dan kimiawi dari aerosol dan interaksinya dengan awan dan presipitasi pada spasial yang terlokalisir dan dengan skala temporal di bawah kondisi dimana kontrol dinamika atmosfer relatif lemah atau tidak berubah. Berdasarkan perspektif global, kombinasi efek aerosol dari sumber lokal dan dari proses-proses transport yang terjadi dalam bagian-bagian berbeda dari bola bumi, dan dalam musim-musim yang berbeda, sangat mungkin untuk mengubah pola pemanasan skala besar dan gradien tekanan serta menginduksi perubahan-perubahan sirkulasi global atmosfer, mempengaruhi proses-proses pembentukan awan dan hujan. Anomali pemanasan adiabatik dari curah hujan dan awan, selanjutnya dapat mengendalikan sirkulasi global atau regional, yang kembali dapat mengubah karakter dan distribusi aerosol, yang memberikan umpan balik pada pengaruh-pengaruh lokal.<sup>9</sup>

Lau<sup>12</sup> telah melakukan eksperimen dengan menggunakan data *General Circulation Model* (GCM) dan menemukan bahwa anomali pemanasan atmosfer oleh *absorbing aerosols* (aerosol penyerap) dapat menyebabkan *advance monsun* dan intensifikasi lanjutan dari monsun India dengan anomali curah hujan yang meningkat di atas India bagian utara dan Teluk Benggala. Percepatan/kemajuan (*the advance monsun*) monsun tersebut karena percepatan pemanasan di troposfer atas di atas Dataran Tibet pada bulan April-Mei yang diinduksi oleh aerosol penyerap, terutama *black carbon* dan debu di atas lereng Dataran Tibet sebelah selatan dan utara. Karena udara yang hangat naik, anomali pemanasan troposfer atas bertindak sebagai *elevated heat pump* (EHP) yang menarik udara lembab yang hangat dari bawah, menyebabkan peningkatan curah hujan musim panas di India bagian utara. Efek ini konsisten dengan studi-

studi sebelumnya yang mengindikasikan pentingnya fluks radiatif dan fluks panas sensibel di Dataran Tibet dalam mempengaruhi evolusi monsun dari monsun musim panas Asia (Wu dan Zhang, 1998). Intensifikasi monsun India adalah bagian dari anomali sirkulasi skala besar yang terkait dengan pola anomali *dipole sea level pressure*. Anomali *dipole pressure* meningkatkan monsun India dengan memperkuat aliran baratan di level bawah di atas India tengah dan utara, namun memperlemah monsun barat daya di Cina Selatan, sehingga menggeser *rain belt* Mei-yu ke arah barat laut, dan menekan curah hujan di atas Asia Timur dan wilayah lautan yang berdekatan.

Indonesia merupakan negara di ekuator yang siklus airnya sangat dipengaruhi oleh monsun. Di sini lain, pertumbuhan ekonomi dan proses pembangunan, telah menyebabkan peningkatan aktivitas ekonomi, yang berdampak pada peningkatan konsentrasi polutan di atmosfer, termasuk aerosol. Berdasarkan hal ini, sangat dimungkinkan bahwa aerosol akan memberikan pengaruh pada siklus air atmosfer dan sistem sirkulasi regional yang ada di Indonesia. Kajian ini bertujuan mempelajari dengan interaksi antara aerosol dan sistem monsun di Indonesia, namun lebih menekankan pada pengaruh monsun terhadap konsentrasi aerosol dan dampaknya pada neraca radiasi di permukaan. Dengan demikian, karakteristik aerosol dan efek radiatifnya dianalisis berdasarkan musiman, terutama kondisi sebelum dan setelah monsun Asia. Beberapa kejadian yang bersifat lokal akan memberikan karakteristik khusus pada variasi aerosol dan dampaknya. Pada tulisan ini dibandingkan kasus yang terjadi di Kalimantan terhadap rata-rata total seluruh Indonesia. Perbandingan dilakukan terhadap variable AOD, radiasi netto di permukaan, *aerosol radiative forcing* (ARF) dan efektivitas pengaruh aerosol terhadap radiasi netto di permukaan.

## METODOLOGI

Data yang digunakan untuk kajian ini adalah data *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) yang mencakup parameter gelombang panjang dan gelombang pendek di permukaan, serta data *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) yang mencakup parameter *aerosol optical depth* (AOD). Baik data CERES maupun data MODIS, keduanya memiliki resolusi spasial 1 derajat dan resolusi temporal bulanan, dengan periode Maret 2000 sampai Desember 2011. Pengambilan periode data ini didasarkan pada kesesuaian periode

ketersediaan data MODIS dan CERES. Dalam analisisnya dilakukan 2 lingkup yang berbeda, yaitu lingkup Indonesia (20°LS-20°LU, 80°-150°BT) dan lingkup Kalimantan (3°LS-2°LU, 110°-115°BT). Berdasarkan perbandingan ini diharapkan akan dapat memunculkan karakteristik lokal yang lebih spesifik dibandingkan dengan kasus umum yang terjadi di Indonesia. Perbandingan dilakukan terhadap beberapa parameter yang dapat menggambarkan perbedaan kondisi aerosol, kondisi radiasi, efek radiatif aerosol, dan efektivitas aerosol dalam mempengaruhi radiasi di permukaan

Parameter yang digunakan sebagai indikator pengaruh aerosol terhadap energi radiatif adalah *aerosol radiative forcing* (ARF), yang difokuskan pada level permukaan. *Aerosol radiative forcing* di permukaan ditentukan sebagai perbedaan antara fluks netto di permukaan pada kondisi 'bersih' dan fluks netto pada kondisi terpolusi (persamaan 1). Apabila disusun berdasarkan komponennya, ARF total merupakan penjumlahan ARF untuk gelombang pendek dan ARF untuk gelombang panjang (persamaan 2), yang masing-masing merupakan selisih antara fluks radiasi dalam kondisi terpolusi aerosol dan fluks radiasi dalam kondisi bersih (persamaan 3 dan 4), seperti persamaan berikut :

$$\Delta F = F_{aer} - F_{clean} \quad (1)$$

$$\Delta F = SWF + LWF \quad (2)$$

$$SWF = F_{sw, aer} - F_{sw, clean} \quad (3)$$

$$LWF = F_{lw, aer} - F_{lw, clean} \quad (4)$$

dengan :

- SWF adalah komponen gelombang pendek dari *radiative forcing*
- LWF adalah komponen gelombang panjang dari *radiative forcing*
- adalah fluks total netto di permukaan dalam kondisi terpolusi aerosol
- adalah fluks total netto di permukaan dalam kondisi tanpa aerosol

diperoleh dari nilai fluks total dengan kesesuaian grid dan waktu yang sama dengan kondisi aerosol yang direpresentasikan dengan nilai *aerosol optical depth* (AOD). Untuk menentukan kuantitas atau nilai radiasi dalam kondisi tanpa aerosol, digunakan *slope-method*. Metode ini sering digunakan oleh beberapa peneliti, diantaranya Rajeev.<sup>13</sup> *Slope method* digunakan Rajeev untuk memperoleh nilai

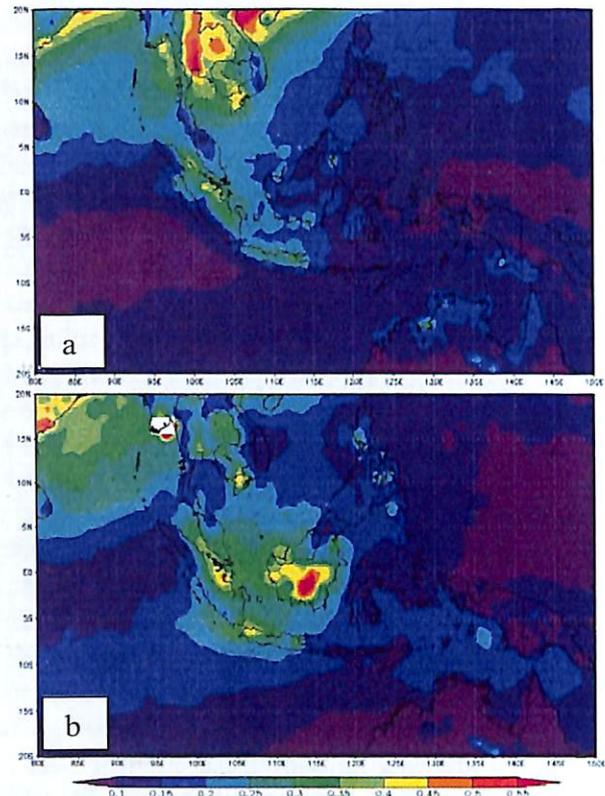
*intercept* sebagai pendekatan untuk memperoleh nilai albedo TOA pada kondisi cerah saat tidak ada aerosol sedangkan nilai *slope* digunakan sebagai pendekatan untuk mengetahui efektivitas aerosol dalam mempengaruhi radiasi (*aerosol forcing effectivity, AFE*), dalam hal ini radiasi di permukaan.

Berdasarkan ARF hasil estimasi, ditentukan rata-rata musiman, Maret-April-Mei (MAM) yang mewakili periode pra-monsoon, dan September-Oktober-November (SON) yang mewakili pasca-monsoon. Untuk menunjang analisis, dilakukan analisis komposit antara parameter AOD dan radiasi netto di permukaan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Aerosol optical depth (AOD)*

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa aerosol di Indonesia memiliki variasi spasial dan temporal yang tinggi. Secara spasial, Indonesia bagian barat seperti Kalimantan, Sumatera bagian timur, dan sebagian dari pulau Jawa, menunjukkan kondisi aerosol dengan konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Indonesia bagian timur. Secara temporal, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara rata-rata AOD untuk periode Maret-April-Mei (MAM) dan periode September-Oktober-November (SON). AOD pada periode SON menunjukkan konsentrasi aerosol yang lebih tinggi dibandingkan periode MAM, dimana pada periode SON, konsentrasi tertinggi terjadi di Kalimantan dengan nilai AOD lebih dari 0,55, sedangkan untuk periode MAM, konsentrasi tertinggi terjadi di Sumatera bagian barat dengan nilai AOD tidak lebih dari 0,45. Gambar 1 merupakan peta AOD Indonesia untuk periode MAM dan SON. Perbedaan nilai AOD juga ditunjukkan dalam batas lingkup yang berbeda, dimana rata-rata nilai AOD untuk lingkup Indonesia adalah 0,152 pada pra monsun dan 0,175 pada pasca monsun. Sedangkan untuk lingkup Kalimantan, nilai rata-rata AOD adalah 0,134 pada periode pra monsun dan 0,366 pada periode pasca monsun.



**Gambar 1.** Variasi spasial rata-rata *Aerosol optical depth (AOD)* tahun 2000-2011 untuk periode MAM (a) dan SON (b)

Tingginya nilai AOD di Kalimantan untuk rata-rata periode SON disebabkan karena adanya kontribusi yang cukup besar dari kejadian kebakaran hutan yang sering terjadi di daerah tersebut. Monsun musim panas Asia yang menyebabkan penurunan curah hujan dan terjadi musim kemarau, memberikan pengaruh pada peningkatan kekeringan di wilayah Indonesia, sehingga mempermudah terjadinya kebakaran. Berdasarkan laporan yang dibuat oleh KLHK, kebakaran di Indonesia memang cenderung terjadi pada periode Agustus-November (pasca monsun) saat kondisi hutan benar-benar kering.

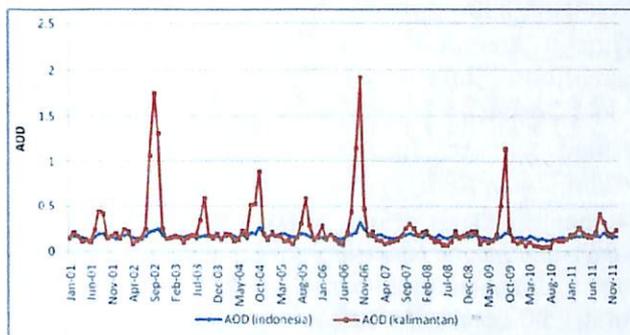
Kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan, memberikan kontribusi yang cukup besar pada variasi temporal AOD dan menyebabkan terjadinya nilai yang cukup ekstrim. Dengan membandingkan nilai rata-rata Kalimantan dan rata-rata seluruh Indonesia dalam deret waktu, dapat diketahui bahwa pada tahun 2002 dan 2006 di Kalimantan terbentuk nilai AOD yang sangat tinggi dan menjadi ekstrim bila dibandingkan dengan rata-rata AOD untuk seluruh Indonesia. Pada tahun 2002, saat nilai AOD rata-rata Indonesia 0,219, di Kalimantan mencapai 1,74, dan pada tahun 2006 saat nilai AOD rata-rata Indonesia berkisar 0,313, AOD rata-rata di Kalimantan mencapai 1,9. Baik untuk tahun 2002

maupun tahun 2006, keduanya terjadi pada pasca monsun (September 2002 dan Oktober 2006).

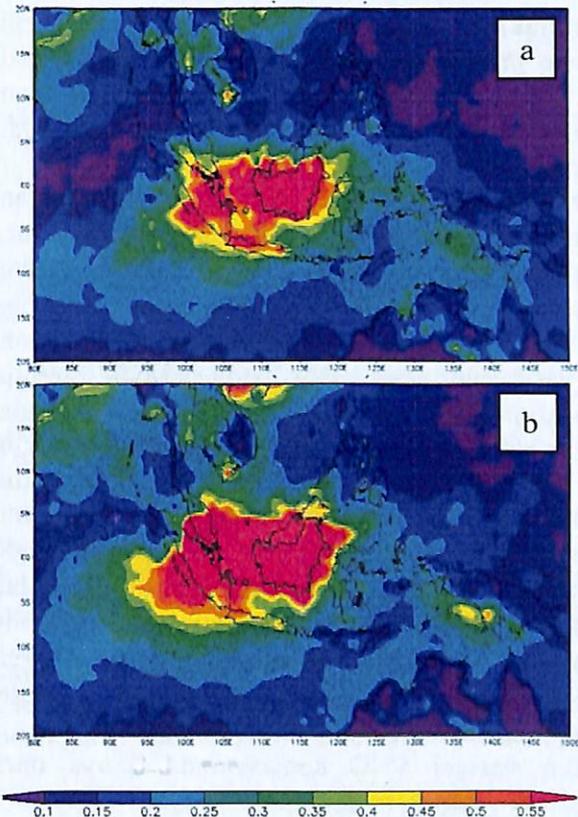
Secara detail, perbedaan nilai AOD rata-rata Kalimantan dan rata-rata Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2. Kebakaran hutan yang terjadi Kalimantan, tidak hanya memberikan efek lokal pada peningkatan AOD, tapi juga pada wilayah yang lebih luas. Gambar 3 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia bagian barat mengalami peningkatan nilai AOD yang disebabkan oleh kebakaran hutan di Kalimantan. Rata-rata nilai AOD Indonesia yang berkisar 0,152, menjadi 0,219 pada tahun 2002 dan menjadi 0,313 pada tahun 2006. Hal ini terlihat pula dari kenaikan nilai minimalnya. Nilai nilai minimal yang tercantum dalam Gambar 4 adalah nilai minimal perbandingan dari seluruh grid pada masing-masing periode. Jika aerosol hasil kebakaran hutan di Kalimantan tidak memberikan efek pada tebal optis aerosol daerah lain, maka seharusnya grid-grid di daerah lain tidak berubah dan nilai AOD terkecil tidak akan menunjukkan perubahan yang signifikan.

**Surface Netto radiation in Clear sky (SNC)**

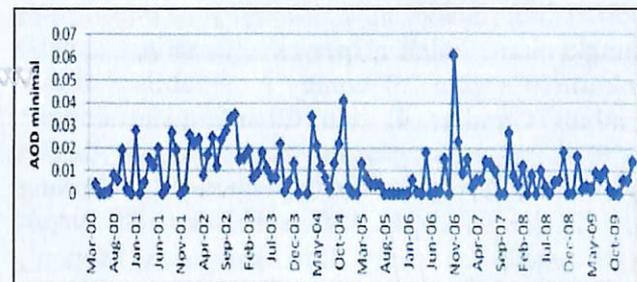
Secara spasial, terjadi variasi yang cukup besar antara SNC periode pra monsun (MAM) dan pasca monsun (SON). Variasi pertama dapat dilihat untuk daerah lautan, dimana untuk periode pra monsun nilai tertinggi (lebih dari 240 W/m<sup>2</sup>) ada di utara ekuator, tepatnya di barat Pasifik atau sebelah utara Papua, sedangkan untuk periode pasca monsun, nilai tertinggi (lebih dari 240 W/m<sup>2</sup>) ada di selatan ekuator atau bagian timur dari Lautan Hindia.



**Gambar 2.** Variasi temporal bulanan rata-rata AOD untuk wilayah Indonesia dan untuk wilayah Kalimantan



**Gambar 3.** Variasi spasial rata-rata Aerosol optical depth (AOD) periode SON tahun 2002 (a) dan 2006 (b).



**Gambar 4.** Variasi temporal nilai minimal AOD untuk wilayah Indonesia

Selain itu terjadi pula di selatan Papua dalam lingkup wilayah yang lebih kecil. Hal ini dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 5. Variasi radiasi netto di permukaan laut ini, lebih dipengaruhi posisi relatif terhadap matahari. Variasi kedua, untuk daratan, selain pengaruh posisi relatif terhadap matahari, kondisi permukaan juga memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap variasi SNC. Wilayah yang paling menunjukkan perbedaan SNC antara periode pra dan pasca monsun adalah Kalimantan, dimana pada periode pasca monsun memiliki nilai SNC yang lebih rendah dibandingkan pra monsun (dibawah 190 W/m<sup>2</sup>). Untuk sebagian besar wilayah Kalimantan

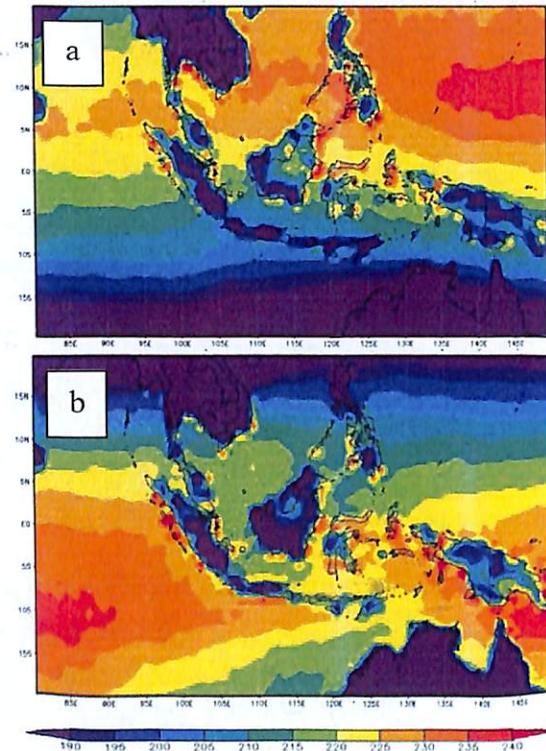
menunjukkan nilai SNC yang relatif tinggi periode pra-monsoon berkisar antara 205 sampai 225 W/m<sup>2</sup>. Daerah lainnya tidak menunjukkan variasi yang terlalu besar seperti yang terjadi di Kalimantan.

Dalam deret waktu, SNC di Kalimantan memang menunjukkan variasi yang cukup besar. Dikatakan cukup besar karena fluktuasi yang terbentuk, lebih besar dibandingkan dengan fluktuasi untuk rata-rata seluruh Indonesia. Selain dari variasinya yang besar, pada periode tertentu di Kalimantan menunjukkan perbedaan pola dengan rata-rata Indonesia. Pada November 2006 saat SNC rata-rata Indonesia mengalami peningkatan, untuk Kalimantan justru mengalami penurunan yang sangat tajam, sampai menjadi sekitar 120 W/m<sup>2</sup>. Nilai tersebut merupakan nilai terendah dalam periode yang dikaji. Untuk lebih detail, perubahan SNC di Kalimantan dalam deret waktu dan perbandingannya dengan rata-rata Indonesia, dapat dilihat pada Gambar 6.

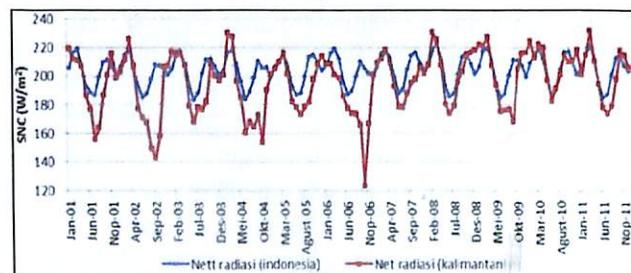
Jika variasi SNC semata-mata hanya dari pengaruh perubahan posisi relatif matahari terhadap bumi, maka variasinya akan cenderung menjadinya sebuah sinusoidal murni. Namun dengan adanya perubahan komposisi atmosfer, memungkinkan terjadi anomali positif (penguatan SNC) atau anomali negatif (pelemahan SNS) atau *dimming* seperti yang diungkapkan oleh banyak peneliti seperti Ackerman<sup>6</sup> dan Twomey<sup>7</sup>. Apabila dilihat kembali Gambar 4, dan dibandingkan dengan Gambar 6, maka secara sekilas dapat dilihat bahwa SNC menunjukkan pola berbanding terbalik dengan AOD. Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Menon<sup>1</sup>, Lou<sup>2</sup>, Hansen<sup>3</sup>, Ramanathan<sup>4</sup>, maupun Ackerman<sup>6</sup> dan Kaufman<sup>10</sup>, yang menunjukkan bahwa aerosol memberikan pengaruh signifikan pada iklim, terutama pada keseimbangan neraca radiasi, yang pada umumnya memberikan efek pendinginan atau *dimming*.

Meskipun banyak penelitian menganalisa tren radiasi matahari di seluruh dunia, sangat sedikit telah dilakukan di Indonesia. Kambezidis<sup>14</sup> mengutip hasil penelitian yang dilakukan oleh Padma Kumari pada tahun 2007, yang menganalisis variasi radiasi matahari rata-rata bulanan di 12 stasiun di perkotaan di India untuk periode 1984-2004. Mereka melaporkan rata-rata penurunan radiasi matahari kurang lebih 0.86 W/m<sup>2</sup> per tahun, sementara selama periode musim dingin, pra-monsoon dan monsoon pengurangan tersebut terjadi sekitar 0.94, 1.04 dan 0,74 W/m<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan perbedaan kondisi radiasi yang cukup signifikan antara satu

musim dengan musim lainnya, seperti juga yang terjadi di Indonesia. Apa yang dilakukan Kumari dengan hasil estimasi dalam penelitian ini, keduanya menunjukkan kemiripan pola dan karakter yang terlokalisir, meskipun tetap akan menunjukkan banyak perbedaan yang disebabkan faktor geografis dan komposisi atmosfernya.



Gambar 5. Variasi spasial *Surface Netto radiation in Clear sky (SNC)* rata-rata untuk periode MAM (a) dan SON (b) tahun 2000-2011 dalam Watt/m<sup>2</sup>.



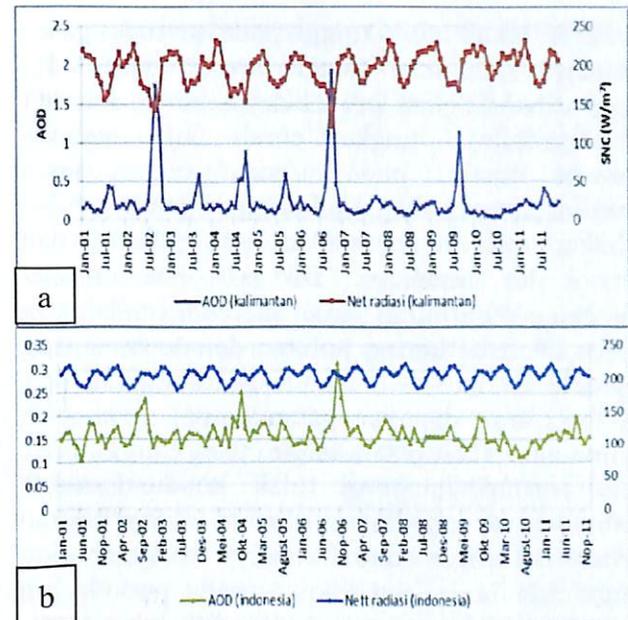
Gambar 6. Deret waktu variasi temporal *Surface Netto radiation in Clear sky (SNC)* rata-rata bulanan untuk Kalimantan dan seluruh wilayah Indonesia dari Maret 2000 sampai Desember 2011.

### *Aerosol Radiative Forcing (ARF)*

Radiasi yang sampai di permukaan bumi, merupakan 'sisa' dari proses penyerapan, pemencaran serta pemantulan oleh gas dan partikel-partikel di atmosfer, yang terjadi pada gelombang pendek dari matahari dan gelombang panjang dari bumi yang dipantulkan kembali ke permukaan, sehingga fluktuasi radiasi netto di

permukaan sangat ditentukan oleh komposisi atmosfer yang dilewatinya. Salah satu komponen yang mempengaruhi neraca radiasi di permukaan adalah komponen aerosol dalam atmosfer. Perbedaan kondisi atmosfer Kalimantan dengan rata-rata seluruh Indonesia, salah satunya disebabkan adanya konsentrasi aerosol yang lebih tinggi. Apabila dibuat rata-rata untuk seluruh grid dan untuk seluruh periode kajian, maka dapat dibandingkan nilai rata-rata tersebut untuk seluruh Indonesia dan khusus untuk Kalimantan. Nilai rata-rata AOD adalah 0,159 untuk Indonesia dan 0,241 untuk Kalimantan. Nilai SNC rata-ratanya adalah 204,74 W/m<sup>2</sup> untuk Indonesia dan 195,87 W/m<sup>2</sup> untuk Kalimantan. Ini memberika indikasi bahwa antara konsentrasi aerosol dan radiasi netto di permukaan memiliki korelasi terbalik, atau dapat pula dikatakan bahwa aerosol menyebabkan penurunan radiasi yang sampai di permukaan bumi. Hal ini sejalan juga dengan komposit *time series* antara AOD dan SNC di Kalimantan seperti pada Gambar 7(a). Penurunan SNC yang drastis di Kalimantan, terjadi pada saat nilai AOD mengalami lonjakan, seperti yang terjadi pada tahun 2002 dan 2006. Pola ini mendukung pernyataan dan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Stanhill<sup>5</sup>, Ackerman<sup>6</sup>, dan Ramanathan<sup>15</sup>, bahwa aerosol memberikan *dimming effect* terhadap permukaan bumi.

*Dimming effect* seperti yang terlihat dalam pola radiasi dan AOD di Kalimantan, tidak dapat terlihat dalam rata-rata wilayah yang lebih luas. Komposit deret waktu rata-rata AOD dan SNC untuk seluruh grid wilayah Indonesia pada Gambar 7(b), tidak menunjukkan pola yang sama seperti kasus spesifik di Kalimantan. Dengan demikian, *dimming effect* atau efek pendinginan permukaan yang disebabkan aerosol lebih bersifat lokal dimana aerosol tersebut berada. Meskipun demikian, sering dikatakan bahwa aerosol memberikan efek global pada pendinginan permukaan. Hal ini lebih disebabkan faktor transportasi aerosol yang bersifat global, yang dipengaruhi oleh berbagai sirkulasi atmosfer. Ketika aerosol dapat mencapai ketinggian dimana sirkulasi global terjadi, maka aerosol dapat menyebar secara luas dan memberikan efek dimana aerosol tersebut tersebar. Efek aerosol terhadap radiasi sering dinyatakan sebagai *aerosol radiative forcing*.



**Gambar 7.** Komposit deret waktu antara AOD dan SNC untuk Kalimantan (a) dan seluruh wilayah Indonesia (b) dari Maret 2000 sampai Desember 2011.

Seperi dikemukakan dalam bagian data dan metodologi, ARF ditentukan dari perbedaan antara net radiasi pada kondisi berpolusi (aerosol) dan net radiasi pada kondisi bersih. Kondisi bersih diestimasi berdasarkan nilai *intercept* dari *slope method*. Hasil *Slope method* antara AOD dan SNC untuk rata-rata Indonesia dan kasus Kalimantan ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposit deret waktu antara AOD dan SNC untuk Kalimantan dan seluruh wilayah Indonesia dari Maret 2000 sampai Desember 2011

	Persamaan regresi	SNC <sub>aer</sub>	ARF (W/m <sup>2</sup> )
<b>Indonesia</b>			
Pra monsun	Y = 17,869x+204	207,57	3,57
Pasca monsun	Y = -41,698x+217,7	210,39	-7,31
<b>Kalimantan</b>			
Pra monsun	Y = -36,926x+210,52	205,54	-5,38
Pasca monsun	Y = -54,796x+215,88	195,77	-20,11

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa dalam lingkup yang lebih kecil (lingkup Kalimantan dibandingkan dengan lingkup Indonesia), ARF lebih mudah dideteksi dan mendukung pernyataan bahwa aerosol memberikan efek pendinginan bagi permukaan.<sup>15</sup> Apabila dibuat perbandingan antara pra monsun dan pasca monsun, maka efek pendinginan yang terjadi lebih besar terjadi pada periode pasca monsun, dengan nilai ARF sebesar -20,11 untuk kasus lingkup Kalimantan, dan -5,38 untuk kasus lingkup Indonesia. Adanya beban aerosol dalam

atmosfer yang lebih tinggi pada periode pasca monsun disebabkan tingkat emisi yang lebih tinggi dibandingkan proses deposisinya. Di satu sisi, rendahnya tingkat curah hujan selama monsun musim panas Asia sampai pasca monsun, menyebabkan kekeringan, hutan mudah terbakar dan mengemisikan gas polutan dan aerosol ke atmosfer. Di sisi lain, proses pencucian oleh curah hujan menjadi rendah dan proses deposisi kering polutan dan aerosol yang terjadi lebih dominan, yang tergantung pada gaya gravitasi, arah dan kecepatan angin, serta jenis permukaan. Kecepatan angin yang tinggi serta jenis permukaan yang tidak konduktif untuk mempercepat terjadinya deposisi, menyebabkan aerosol berada di atmosfer dalam rentang waktu yang lebih lama. Sebaliknya, pada periode pra monsun pasca musim hujan di Indonesia, pada umumnya kelembaban permukaan lebih tinggi, sehingga mempermudah terjadinya deposisi kering. Selain itu, emisi aerosol, khususnya dari kebakaran hutan, cenderung lebih rendah. Hal ini yang menyebabkan ARF pada periode pasca monsun lebih tinggi dibandingkan periode pra monsun.

Hal lain yang dapat ditunjukkan dari Tabel 1 adalah bahwa pada periode pasca monsun, aerosol lebih menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam mempengaruhi radiasi. Hal ini dapat dilihat dari nilai AFE yang diwakili oleh nilai *slope* persamaan di atas. Semakin negatif nilai *slope* dalam persamaan regresi di atas, maka semakin tinggi efektivitas aerosol dalam mempengaruhi radiasi netto di permukaan.

Tidak seperti yang dikutip oleh Kambezidis<sup>14</sup> terhadap hasil penelitian yang dilakukan oleh Ohmura tahun 2009 yang menemukan rata-rata tren penurunan radiasi matahari sekitar 0,5 W/m<sup>2</sup> per tahun, tren SNC di Indonesia belum menunjukkan adanya penurunan yang signifikan, namun masih tetap menunjukkan adanya peningkatan. Hasil kajian di Indonesia memang menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara jumlah radiasi yang sampai di permukaan dengan konsentrasi aerosol, namun tidak berarti terjadi penurunan nilai SNC dalam tren waktu yang dianalisis. Hasil kajian ini mendukung apa yang diungkapkan oleh Ramanathan<sup>15</sup> yang menunjukkan bahwa penurunan radiasi matahari di permukaan seringkali berhubungan dengan peningkatan muatan aerosol atmosfer karena berkembang industrialisasi, polusi kendaraan, pembakaran biomassa dan kegiatan yang menghasilkan debu.

Perbedaan antara tren radiasi yang terjadi di Indonesia dengan tren dikaji oleh Ohmura yang

dikuti oleh Kambezidis<sup>14</sup>, kemungkinan disebabkan adanya perbedaan periode kajian, dan bagian dari radiasi mana yang dianalisis. Dalam penelitian Ohmura, bagian yang dikaji lebih spesifik pada radiasi matahari yang sampai di permukaan bumi, sedangkan dalam kajian ini adalah total radiasi netto (gabungan antara radiasi matahari dan radiasi gelombang panjang) yang sampai di permukaan bumi. Karena gelombang panjang bersumber dari bumi, maka terdapat kemungkinan bahwa terjebaknya gelombang panjang di atmosfer, mengakibatkan peningkatan jumlah radiasi total di permukaan bumi. Hal ini tentunya memerlukan kajian yang lebih dalam, apakah aerosol memberikan efek yang sama terhadap gelombang pendek dan gelombang panjang di permukaan.

## **KESIMPULAN**

Interaksi antara aerosol dan sistem monsun di Indonesia menunjukkan adanya beban aerosol dalam atmosfer yang lebih tinggi pada periode pasca monsun disebabkan tingkat emisi yang lebih tinggi dibandingkan proses deposisinya. Selain itu, pada periode pasca monsun, aerosol lebih menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam mempengaruhi radiasi. Nilai negatif dari ARF menunjukkan bahwa aerosol memberikan efek pendinginan bagi permukaan. Apabila dibuat perbandingan antara pra monsun dan pasca monsun, maka efek pendinginan yang terjadi lebih besar terjadi pada periode pasca monsun. Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya bahwa aerosol cenderung memberikan efek pendinginan sebagai pengaruh langsung terhadap permukaan, yang disebabkan oleh karakternya yang dapat memencarkan dan memantulkan radiasi matahari, sehingga terjadi reduksi radiasi matahari yang sampai ke permukaan.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Kepala PSTA dan Kepala Bidang Komposisi Atmosfer, LAPAN Bandung yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh rekan di Bidang Komposisi Atmosfer yang telah memberikan saran dan masukannya.

## **DAFTAR PUSTAKA**

<sup>1</sup>Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y, *Climate effects of black carbon aerosols in*

- China and India*. Science 297:2250–2253, 2002.
- <sup>2</sup>Lau, K. M., M. K. Kim, K. M. Kim, 2006. *Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau*, Climate Dynamics, 26: 855–864, DOI 10.1007/s00382-006-0114-z.
- <sup>3</sup>Hansen, J., M. Sato, L. Nazarenko, R. Ruedy, A. Lacis, D. Koch, I. Tegen, T. Hall, D. Shindell, B. Santer, P. Stone, T. Novakov, L. Thomason, R. Wang, Y. Wang, D. Jacob, S. Hollandsworth, L. Bishop, J. Logan, A. Thompson, R. Stolarski, J. Lean, R. Willson, S. Levitus, J. Antonov, N. Rayner, D. Parker, and J. Christy, 2002. *Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations*. J. Geophys. Res., 107, no. D18, 4347, doi:10.1029/2001JD001143.
- <sup>4</sup>Ramanathan V, Chung C, Kim D, Bettge T, Buja L, Kiehl JT, Washington WM, Fu Q, Sikka DR, Wild M, 2005. *Atmospheric brown clouds: impact on South Asian climate and hydrologic cycle*. Proc Natl Acad Sci 102:5326–5333, DOI 10.1073/pnas.0500656102.
- <sup>5</sup>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. Meteorol., 107, 255–278.
- <sup>6</sup>Ackerman, A. S., 2000. *Reduction of tropical cloudiness by soot*, Science, 288(5468), 470 1042–1047, doi:10.1126/science.288.5468.1042
- <sup>7</sup>Twomey, 1977. *Atmospheric aerosols*, Volume 7 of Developments in atmospheric science, Elsevier Scientific Pub. Co.
- <sup>8</sup>Rosenfeld, D., 2006. "Aerosol-Cloud Interactions Control of Earth Radiation and Latent Heat Release Budgets". Space Sci Rev 125 (1-4): 149–157. Bibcode: 2006SSRV.125..149R. doi:10.1007/s11214-006-9053-6.
- <sup>9</sup>Li, Z., and T. Yuan, 2006. *Exploring aerosol-cloud-climate interaction mechanisms using the new generation of earth observation system data*, Current problems in atmospheric radiation, Eds. H. Fischer and B.-J. Song, Deepak Pub, 1-4.
- <sup>10</sup>Kaufman, Y. J., L.A. Remer, D. Tanré, R. Li, R. Kleidman, S. Mattoo, R. C. Levy, T. F. Eck, B.N. Holben, C. Ichoku, J.V. Martins, and I.Koren, 2005. *A Critical Examination of the Residual Cloud Contamination and Diurnal Sampling Effects on MODIS Estimates of Aerosol Over Ocean*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 12, 2889-2897.
- <sup>11</sup>Ranjan, R.R., H.P. Joshi, K.N. Iyer, 2007. *Spectral Variation of Total Column Aerosol Optical Depth over Rajkot: A Tropical Semi-arid Indian Station*. Aerosol and Air Quality Research, Vol. 7, No. 1, pp. 33-45.
- <sup>12</sup>Lau, K.M., M. K. Kim, K. M. Kim, 2006. *Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau*. Climate Dynamics, 26: 855–864. DOI 10.1007/s00382-006-0114-z.
- <sup>13</sup>Rajeev, K., V. Ramanathan, *Direct observations of clear-sky aerosol radiative forcing from space during the Indian Ocean Experiment*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. D15, pages 17,221–17,235, August 16, 2001.
- <sup>14</sup>Kambezidis, H.D., D.G. Kaskaoutis, S.K. Kharol, K.K. Moorthy, S.K. Satheesh, M.C.R. Kalapureddy, K.V.S. Badarinath, A.R. Sharma, M. Wild, 2012. *Multi-decadal variation of the net downward shortwave radiation over south Asia: The solar dimming effect*. Atmospheric Environment 50, 360-372.
- <sup>15</sup>Ramanathan V, Chung C, Kim D, Bettge T, Buja L, Kiehl JT, Washington WM, Fu Q, Sikka DR, Wild M, *Atmospheric brown clouds: impact on South Asian climate and hydrologic cycle*. Proc Natl Acad Sci 102:5326–5333, DOI 10.1073/pnas.0500656102, 2005