

DISTRIBUSI SPASIAL - TEMPORAL AEROSOL *BLACK CARBON* DI INDONESIA

Rosida

**Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
e-mail: rosida@lapan. go. id**

ABSTRACT

Black Carbon is a primary aerosol that is emitted directly from the source and is the result of incomplete combustion process. Black carbon aerosol plays an important role in influencing climate change because of its ability is very strong in absorbing sunlight in a broad spectral range. In this study we analyzed the spatial and temporal distribution of the density of BC [BC] using data reanalysis Modern Era-Restrospective Analysis for Research and Application (MERRA), from 2001 to 2015 in the Indonesian region (15°S -15°U; 90°-150°E). In addition, the analysis was also performed in some urban locations to explore the contribution of forest fires to [BC] in urban areas. The analysis showed a significant effect of forest fires on the distribution pattern BC. Trend of high distribution of BC in Indonesian territory on average occured in September and October. The highest density was found in 2015 by $37,83 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2$. The result of urban analysis showed the largest contribution of forest fires to the [BC] occur in Palangkaraya.

Keywords : *Black carbon, MERRA, reanalysis, forest fires, Indonesia.*

ABSTRAK

*Black Carbon adalah aerosol primer yang diemisikan secara langsung dari sumbernya dan merupakan hasil dari proses pembakaran tidak sempurna. Aerosol black carbon berperan sangat penting dalam mempengaruhi perubahan iklim karena kemampuannya yang sangat kuat dalam mengabsorpsi cahaya matahari dalam rentang spektral yang luas. Dalam penelitian ini telah dilakukan analisis secara spasial dan temporal distribusi densitas BC dengan menggunakan data reanalisis *Modern Era-Restrospective Analysis for Research and Application* (MERRA), periode 2001 sampai 2015 dengan lokasi wilayah Indonesia (15° LS-15°LU; 90°-150°BT). Selain itu, dilakukan juga analisis pada beberapa lokasi perkotaan untuk melihat kontribusi kebakaran hutan terhadap [BC] di perkotaan. Hasil analisis menunjukkan pengaruh kebakaran hutan cukup signifikan terhadap pola distribusi BC. Tren distribusi BC yang tinggi di wilayah Indonesia rata-rata terjadi pada bulan September dan Oktober. Densitas tertinggi ditemukan pada tahun 2015 sebesar $37,83 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2$.*

Hasil analisis perkotaan menunjukkan kontribusi kebakaran hutan terbesar terhadap [BC] terjadi di Palangkaraya.

Kata-kunci: Black Carbon, MERRA, reanalisis, kebakaran hutan, Indonesia

1 PENDAHULUAN

Black Carbon [BC] merupakan komponen penting dari aerosol atmosfer yang dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna hidrokarbon yang mengandung bahan-bahan termasuk diantaranya bahan bakar fosil, bahan bakar-bio dan biomassa. Densitas BC aerosol di atmosfer yang berasal dari penggunaan batubara, minyak dan bahan bakar fosil lainnya, pembakaran lahan pertanian serta emisi gas buang kendaraan telah meningkat dengan pesat sejak revolusi industri (Zhang, 2011). Masalah BC saat ini harus sudah mendapat perhatian yang lebih bukan hanya karena pertimbangan sebagai kontributor kedua terbesar terhadap pemanasan global, tapi juga karena dampaknya yang sangat serius terhadap kesehatan manusia, karena ukurannya yang sangat halus dalam ukuran *sub-micron* yang sangat mudah terendapkan dalam sistem pernafasan. Berkaitan dengan hal tersebut, telah dilakukan pengamatan-pengamatan aerosol BC secara global termasuk Asia Selatan (Steiner (2009); Beegum dkk. (2009); Corrigan dkk. (2007); Husain dkk. (2007).

BC adalah unsur kimia *inert* dengan ukuran yang sangat halus dan mekanisme penghilangannya di atmosfer dapat dilakukan dengan 3 cara yaitu deposisi kering, deposisi basah dan deposisi gravitasi. Tapi dari ketiga cara tersebut maka proses deposisi basah adalah cara yang paling signifikan (Babu and Moorthy, 2001). Waktu tinggal (*lifetime*) partikel BC kira-kira lebih dari 1 minggu lamanya yang memungkinkan partikel BC ini bertransport ke jarak yang cukup jauh. Hansen dkk. (2000); Jacobson (2001); Chung dan Seinfeld (2005); dan Ramanathan and Carmichael (2008), menjelaskan bahwa lamanya waktu tinggal yang ditambah dengan kemampuan yang sangat kuat dari BC untuk mengabsorpsi cahaya matahari pada rentang spektral yang luas (*wide spectral range*), mulai dari panjang gelombang *visible* sampai infra-merah, menjadikan BC sebagai kontributor yang sangat potensial dalam pemanasan global. Selain itu BC juga dapat mempengaruhi albedo awan dengan mengubah sifat higroskopis awan dalam perannya sebagai inti kondensasi awan, yang kemudian berkontribusi pada *forcing* iklim secara tidak langsung (Lohmann dkk., 2000; Ackerman

dkk., 2000). Oleh karena itu, walaupun dalam proporsi yang sangat kecil, kira-kira <10% dari total aerosols di atmosfer, namun dampaknya terhadap iklim dan lingkungan atmosfer tidak dapat diabaikan.

Berdasarkan hasil analisis perhitungan secara detail yang dilakukan Bond dkk (2004) dan berdasarkan laporan yang dirilis IPCC (2007) diperkirakan emisinya telah mencapai 8,0 Tg C per tahun. Sumber emisi terbesar yang terjadi sebelum 1950 diperkirakan berasal dari Amerika Utara dan Eropa Barat, tapi saat ini sumber emisi tersebut berasal dari daerah tropis dan negara-negara berkembang di Asia Timur (Bond dkk., 2007). Di China, banyak sekali konsumen batubara, pembakaran batubara menjadi sumber utama dari emisi aerosol BC. Sumber lain dari aerosol BC di China adalah dari pembakaran jerami di daerah pedesaan. Cao dkk. (2007) mengestimasi bahwa China mengemisikan sekitar 1,5 Tg BC pada sekitar tahun 2000 dengan emisi terbesar terjadi di bagian timur China.

Saat ini sudah semakin banyak dikenal dan diakui bahwa penelitian tentang BC penting untuk dilakukan. Terutama yang berkaitan dengan masalah sumber emisi, distribusi temporal dan spasialnya, serta pengaruh aerosol BC terhadap lingkungan dan perubahan iklim. Bahkan penelitian ini sudah termasuk dalam subjek utama riset lingkungan atmosfer dan perubahan iklim.

Hampir setiap tahun Indonesia dihadapkan dengan masalah kebakaran lahan gambut, terutama yang seringkali terjadi di Kalimantan dan Sumatera. Berdasarkan laporan pengendalian kebakaran hutan dan lahan tercatat bahwa sejak tahun 2000 sampai dengan saat ini telah terjadi kebakaran lahan hutan gambut di Kalimantan dan Sumatera telah banyak menimbulkan dampak seperti asap yang selain mencemari lingkungan juga sangat mengganggu kesehatan (KLH, 2006; Sofianti dan Sinatra, 2012; Susanto, 2015). Dari informasi titik panas (*hotspot*) yang diperoleh dari LAPAN menunjukkan total titik panas pada bulan September 2015 sebanyak 37444 titik panas, dan sebanyak 34041 total titik panas terjadi pada bulan Oktober 2015 dengan tingkat kepercayaan data >80%. Titik-titik panas tersebut sebagian besar terkonsentrasi di Sumatera dan Kalimantan. (LAPAN, 2016). Untuk mengetahui kondisi wilayah Indonesia terutama dari pengaruh BC aerosol pada saat kejadian kebakaran hutan, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis secara spasial dan temporal distribusi massa aerosol BC di wilayah Indonesia. Penelitian ini menggunakan 15 tahun data reanalisis dari MERRA dengan resolusi temporal rata-rata bulan.

2 METODE PENELITIAN

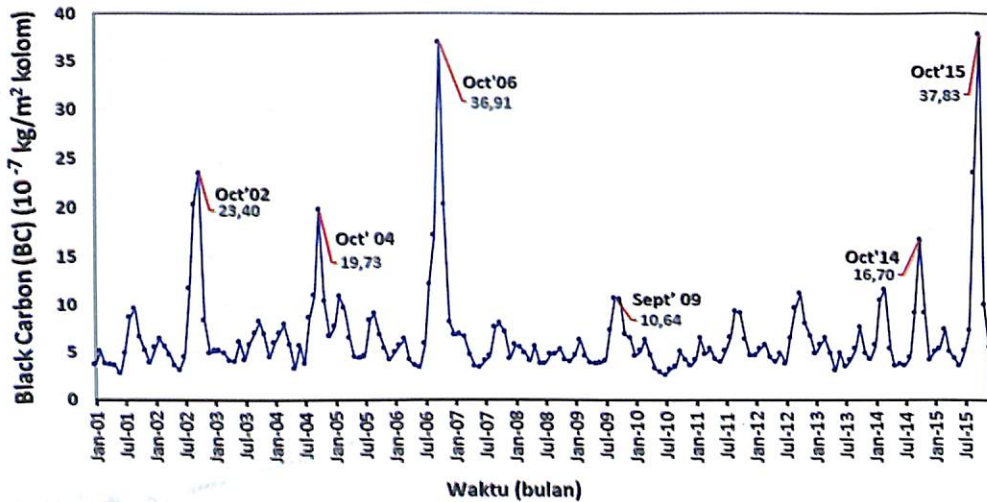
Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data aerosol black carbon (BC) rata-rata bulan yang diunduh dari NASA-Giovanni (NASA, 2016). Data ini adalah data reanalisis yang diperoleh dari MERRA (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*) dengan resolusi spasial data 0,625 longitud dan 0,5 latitud. Resolusi temporal data 15 tahun dari Januari 2001 sampai dengan Desember 2015 dengan format hdf.

Lokasi penelitian yang dipilih adalah wilayah Indonesia, dan sebagai studi kasus, penelitian difokuskan pada wilayah yang sering mengalami kebakaran hutan yaitu Kalimantan dan Sumatera. Pengolahan data dikerjakan dengan menggunakan GrADS versi 2. Pengolahan data diawali dengan menentukan nilai rata-rata bulan untuk mengidentifikasi dan menganalisis tren variabilitas distribusi temporal dan spasialnya. Kontribusi kebakaran hutan gambut juga dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap densitas massa aerosol BC dalam skala urban (perkotaan). Kemungkinan adanya fenomena ekstrim dilakukan dengan menganalisis anomalnya terhadap data klimatologisnya.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Variasi bulanan densitas massa black carbon (BC).

Untuk mengetahui tren perubahan secara temporal dan spasial distribusi BC dalam skala waktu panjang, dianalisis data rata-rata bulan selama 15 tahun data, yaitu dari Januari 2001 sampai dengan Desember 2015. Hasil analisis menunjukkan bahwa tren distribusi BC untuk rata-rata di wilayah Indonesia cukup berfluktuasi. Rentang terendah dari distribusinya berfluktuasi diantara nilai lebih besar dari $2 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2$ sampai kira-kira kurang dari $10 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2$ (Gambar 1).

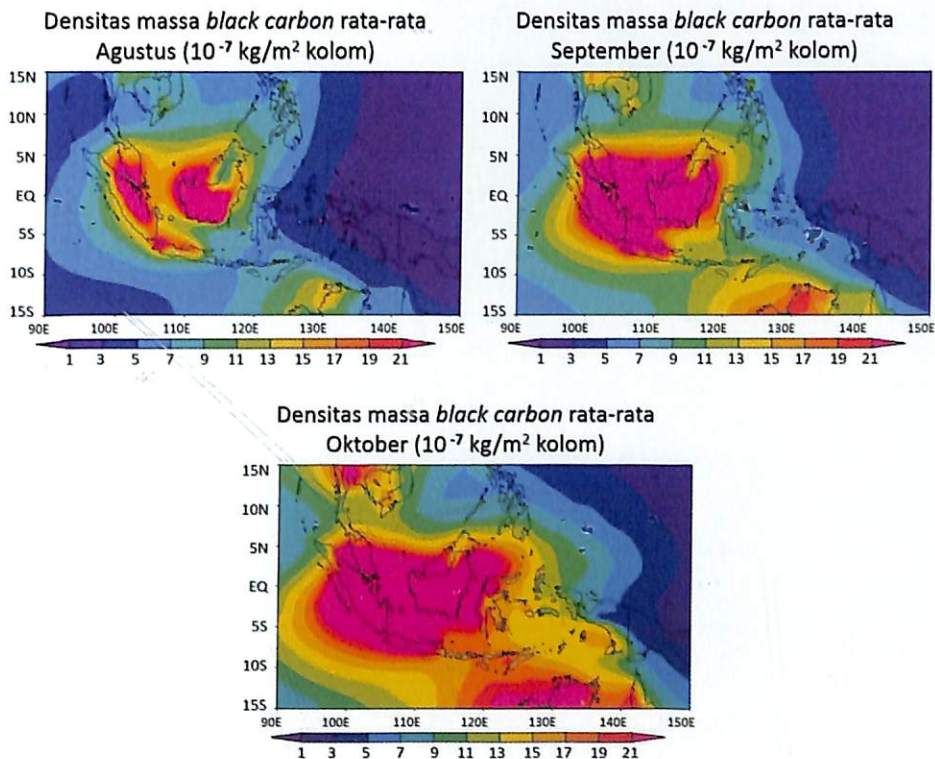


Gambar 1 Tren distribusi bulanan aerosol *black carbon* (BC) dari Januari 2001 sampai Desember 2015 di wilayah Indonesia.

Pada umumnya, distribusi yang tinggi rata-rata terjadi pada musim peralihan ke penghujan yaitu antara bulan September dan Oktober. Dari hasil olahan data, ditemukan nilai [BC] yang tinggi yaitu pada bulan Oktober 2002 dengan densitas tertinggi yang dicapai sebesar $23,40 \times 10^{-7}$ kg/m². [BC] mengalami sedikit penurunan pada bulan Oktober 2004 sampai dengan $19,73 \times 10^{-7}$ kg/m². Pada tahun 2003 dan 2005 tidak terlihat adanya pelonjakan dan nilai densitasnya hanya berfluktuasi pada nilai 2×10^{-7} kg/m² sampai $< 10 \times 10^{-7}$ kg/m². Peningkatan mulai terlihat lagi pada bulan Agustus 2006 dengan nilai yang diperkirakan sudah lebih dari 10×10^{-7} kg/m². Nilai tersebut terus meningkat sampai terjadi pelonjakan yang sangat dramatis yang mencapai nilai densitas yang tinggi sekali yaitu sebesar $36,91 \times 10^{-7}$ kg/m², dan peristiwa ini terjadi pada bulan Oktober 2006. Peristiwa ini berulang terjadi pada tahun 2015 dengan nilai puncak tertinggi yang dicapai pada Oktober 2015 dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terjadi pada Oktober 2006 yaitu $37,83 \times 10^{-7}$ kg/m². Berdasarkan informasi dari Kementerian Lingkungan Hidup (2014) bahwa efek dari fenomena iklim *El Nino* dapat memperluas kebakaran hutan dan lahan (karhutla) dengan kenaikan jumlah titik panas karena terjadi kekeringan yang panjang dan peningkatan suhu udara. Pada tahun 2015 Indonesia dipengaruhi oleh *El Nino* level moderat yang kekuatannya lebih dibandingkan dengan fenomena iklim *El Nino* yang

terjadi pada tahun 2006 (KLH, 2014). Dampak kekeringan yang ditimbulkannya mengakibatkan kejadian kebakaran hutan pada tahun 2015 tersebut menjadi sangat tidak terkendali dan mengakibatkan akumulasi asap yang sangat tebal di Kalimantan dan Sumatera antara Agustus dan Oktober 2015 (BNPB, 2015). Oleh karena itu, penulis memperkirakan bahwa tingginya densitas BC pada tahun 2015 adalah akibat adanya pengaruh *El Nino* level moderat yang pengaruhnya lebih kuat dibandingkan dengan yang terjadi pada tahun 2006.

Secara spasial dapat diidentifikasi perubahan nilai densitas BC dari munculnya warna merah yang mengindikasikan tingginya nilai densitas BC dengan nilai lebih besar dari $21 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2$. Pola spasial pada Gambar 2 adalah pola spasial rata-rata klimatologis.



Gambar 2 Pola spasial klimatologis densitas massa aerosol *black carbon* (BC) dari 2001 – 2015.

Kemunculan BC pada bulan Agustus di atas Sumatera dan Kalimantan dipresentasikan oleh munculnya warna merah dengan luasan yang cukup besar. Sebarannya mencapai puncak dan hampir menutupi sebagian besar wilayah Kalimantan, Sumatera dan Pulau

Jawa pada Oktober 2015. Berdasarkan pola spasial rata-rata bulan, juga menunjukkan variasi perubahan rata-rata bulan yang hampir sama, perbedaannya adalah bahwa [BC] yang densitasnya kurang dari $10 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2$ tidak selalu terjadi pada bulan Oktober. Distribusi spasial rata-rata bulanan, menunjukkan pola distribusi spasial yang sangat fluktuatif. Hal ini diperkirakan karena sumber emisi dan komposisi partikel BC yang bervariasi dan sangat tergantung pada jenis bahan yang terbakar. Pada bab pendahuluan telah dijelaskan bahwa BC terbentuk dari proses pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna. Menurut Bond (2007), yang termasuk dalam kategori sumber utama proses pembakaran tidak sempurna yang menghasilkan partikel BC adalah mesin diesel yang digunakan untuk transportasi atau industri, bahan bakar rumah tangga seperti kayu atau arang, dan proses-proses industri. Hal lain yang diperkirakan mempengaruhi distribusi BC adalah *ratio* BC yang menurut AMAP (2011) relatif lebih tinggi pada pembakaran bahan bakar fosil dibandingkan dengan *ratio* BC pada pembakaran bahan bakar biomasa.

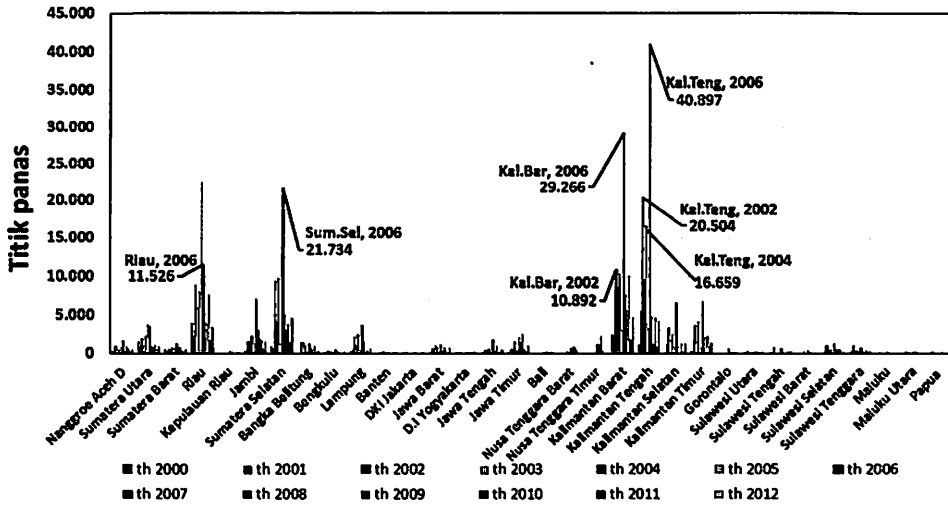
3.2 Kontribusi kebakaran hutan pada [BC] di perkotaan.

Aktivitas pembakaran hutan gambut terutama yang sudah seringkali terjadi di Sumatera dan Kalimantan, saat ini sudah menjadi masalah substansial yang sangat sulit untuk diselesaikan. Aerosol BC, memang bukan komponen utama yang dihasilkan dari pembakaran hutan gambut dan dari jumlah hasil pembakarannya pun relatif sangat kecil dibandingkan dengan total aerosolnya. Namun seperti yang dijelaskan dalam pendahuluan, keberadaan aerosol BC di atmosfer tidak dapat diabaikan karena karakteristiknya yang sangat kuat dalam mengabsorpsi sinar matahari dan dapat menjadikannya sebagai kontributor terhadap pemanasan global. Selain itu ukurannya yang sangat halus dapat mempengaruhi kesehatan manusia bila terhirup pernafasan.

Tren distribusi [BC] untuk beberapa kota di Indonesia sangat bervariasi. Hasil pengolahan data dari Januari 2001 sampai dengan Desember 2015 menunjukkan bahwa hampir di setiap tahun terjadi distribusi [BC] dengan densitas massanya yang sangat bervariasi. Dalam penelitian ini dianalisis beberapa kota di wilayah Indonesia seperti Jakarta, Pekanbaru, Medan, Palangkaraya, Pangkalpinang, Surabaya, Ambon, Makassar dan Biak, untuk melihat kontribusi kebakaran hutan pada [BC] pada kota-kota tersebut.

Titik panas merupakan salah satu indikator dari kejadian

kebakaran hutan. Berdasarkan data titik panas (*hotspots*) dari sumber data Kementerian Kehutanan menunjukkan jumlah titik panas yang cukup besar dan rata-rata terkonsentrasi di Riau, Sumatera Selatan, Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah (Gambar 3).

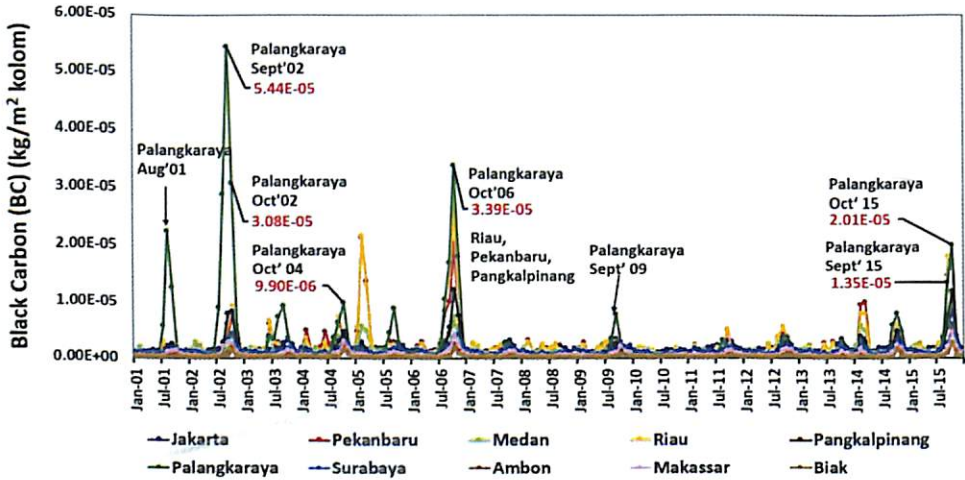


Gambar 3. Sebaran titik panas (*hotspots*) di wilayah Indonesia dari tahun 2000 sampai 2012. (Sumber data dari Kementerian Kehutanan, 2012).

Namun sayangnya data sebaran titik panas tersebut adalah jumlah total titik panas rata-rata provinsi tahunan dan uraiannya tidak secara detail sampai ke perkotaan. Berkaitan dengan kontribusi kebakaran hutan terhadap densitas BC di perkotaan, penulis memperkirakan bahwa kejadian kebakaran hutan yang dipresentasikan oleh jumlah sebaran titik panas baik yang terjadi di Sumatera ataupun di Kalimantan berkontribusi pada peningkatan densitas BC di perkotaan.

Kebakaran hutan yang terjadi pada tahun 2002, menunjukkan jumlah total titik panas yang tertinggi pada saat itu terjadi di Kalimantan Tengah sebanyak 20504 titik panas dan di Kalimantan Barat sebanyak 10892 titik panas (Gambar 3). Berdasarkan analisis perkotaan (Gambar 4), densitas BC di Palangkaraya mencapai puncak tertinggi terjadi pada bulan September 2002 sebesar $5.44 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$, nilai tersebut merupakan nilai tertinggi yang terjadi selama periode 2001-2015. Pada bulan berikutnya (Oktober 2002), [BC] kemudian turun nilainya sampai kira-kira setengahnya dari nilai pada bulan

sebelumnya yaitu $3,08 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$.

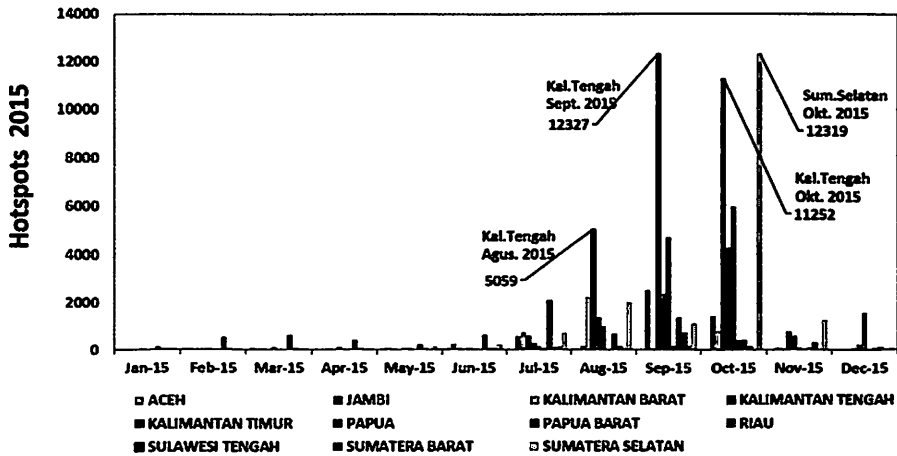


Gambar 4. Tren distribusi [BC] di perkotaan dari Januari 2001 sampai Desember 2015.

Peningkatan [BC] yang terjadi diduga merupakan kontribusi dari peristiwa kebakaran hutan yang terjadi pada saat itu. Sebaran emisi BC pada bulan September 2002 tersebut juga terpantau sampai ke beberapa kota lain seperti Pekanbaru, Pangkalpinang, Medan dan bahkan sampai ke Jakarta dengan densitas yang sangat rendah yang rata-rata nilainya kurang dari $1.0 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$.

Kemudian pada tahun 2006, terjadi sebaran titik panas di Kalimantan Tengah yang jumlah totalnya mencapai 40897 titik panas. Jumlah sebaran titik panas tersebut merupakan jumlah terbesar yang terjadi selama periode 2000–2012. Namun dari analisis perkotaan, densitas BC di Palangkaraya pada Oktober 2006 hanya mencapai $3,39 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$, kira-kira setengah dari nilai densitas BC yang terjadi pada tahun 2002. Sebaran emisi aerosol BC tersebut juga menyebar ke Pekanbaru, dan Pangkalpinang dengan desitas BC yang nilainya lebih besar dari $1.0 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$, kira-kira 2x lipat dari yang terjadi pada tahun 2002.

Berdasarkan data titik panas yang diperoleh dari LAPAN, kebakaran hutan yang terjadi pada tahun 2015, menunjukkan jumlah total titik panas (*hotspot*) tertinggi yang terpantau LAPAN untuk wilayah Indonesia dengan tingkat kepercayaan >80% pada bulan September dan Oktober 2015 adalah > 30000 titik panas. Titik-titik panas tersebut tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia, dan yang terbesar terkonsentrasi di Sumatera dan Kalimantan.



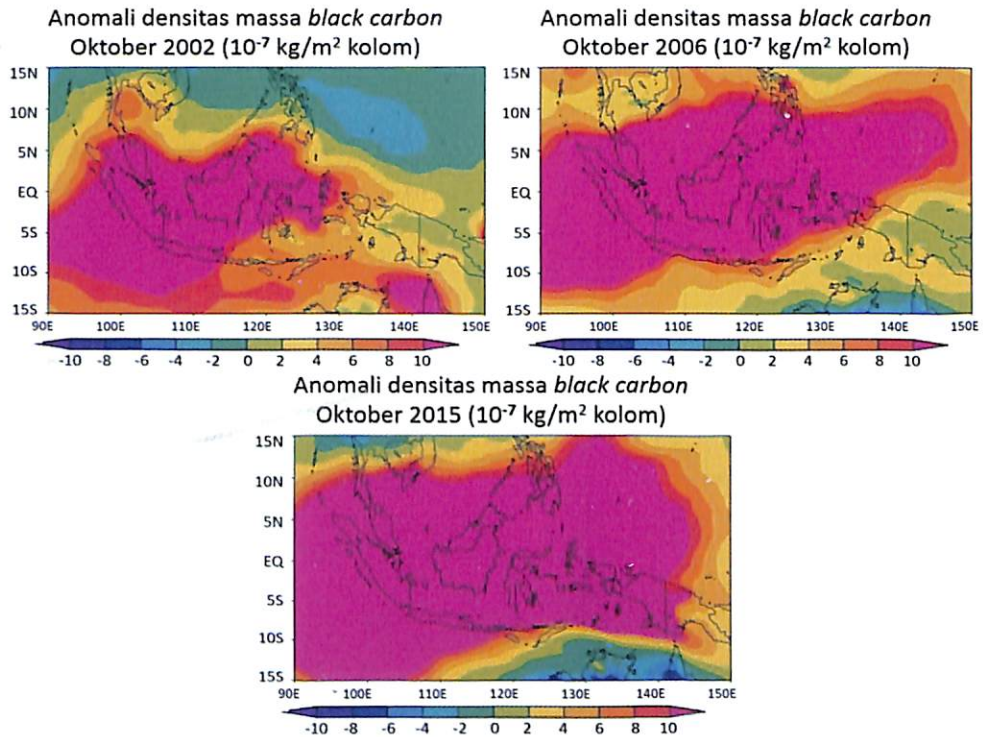
Gambar 5. Sebaran titik panas (*hotspots*) rata-rata bulanan di wilayah Indonesia tahun 2015. (Sumber data LAPAN, 2016).

Berdasarkan analisis perkotaan (Gambar 4), dipresentasikan Palangkaraya merupakan kota yang sangat terpolusi oleh [BC] karena densitasnya yang relatif selalu tinggi terutama pada saat kejadian kebakaran hutan. Penulis menduga bahwa kebakaran hutan gambut di Kalimantan dan Sumatera telah menyumbang pada peningkatan [BC] di perkotaan. Dari hasil analisis rata-rata bulanan pada bulan September dan Oktober 2015 terjadi peningkatan jumlah sebaran titik panas di Kalimantan Tengah masing-masing 12327 dan 11252 titik panas, dan pada saat yang sama data [BC] di Palangkaraya juga mengalami peningkatan sampai sekitar $1,35 \times 10^{-5} - 2,01 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$.

Analisis secara spasial menunjukkan bahwa (Gambar 6), luasan spasial yang berwarna merah pada tahun 2002 tidak selalu yang terjadi pada bulan Oktober 2015, tetapi densitas BC yang terpantau pada tahun 2015 di Palangkaraya hanya mencapai kira-kira setengah bagian dari yang terjadi pada tahun 2002. Kebakaran hutan yang terjadi saat itu mengemisikan aerosol BC dari Palangkaraya sampai ke Pangkalpinang, Pekanbaru dan jika dianalisis secara mendetail kemungkinan sampai ke Medan, Makassar dan Jakarta.

Pada Gambar 4 ditunjukkan densitas BC tertinggi ditemukan di Palangkaraya sebesar $2,01 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$, berikutnya densitas BC di Pekanbaru, Pangkalpinang dan Medan nilainya diantara $1,7 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$ dan $1 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$. Densitas BC di beberapa kota lain yang posisinya jauh dari Sumatera dan Kalimantan seperti Jakarta, Surabaya, Makassar, Ambon dan Biak menunjukkan nilai yang cukup

kecil yaitu antara 8×10^{-6} dan 2×10^{-6} .



Gambar 6. Pola spasial anomali densitas BC rata-rata Oktober pada tahun 2002, 2006 dan 2015.

Seperti yang dijelaskan Babu and Moorthy (2001), dan juga penjelasan Hansen dkk. (2000) bahwa walaupun BC hanya mempunyai waktu tinggal antara 3 – 7 hari saja, tapi karena BC ini termasuk partikel yang sangat ringan (*fine particle*), maka BC mampu melakukan *transport* ke jarak yang jauh. Berdasarkan pendapat tersebut, maka penulis menduga bahwa BC yang terdeteksi di beberapa kota yang jaraknya relatif jauh dari sumber kebakaran, adalah berasal dari kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan dan Sumatera. Secara spasial dapat dilihat pola spasial anomali dari sebaran densitas BC pada bulan Oktober 2002 dan 2006 yang menyebar hampir menutupi seluruh wilayah Indonesia, bahkan pada tahun 2015 menutupi seluruh wilayah Indonesia.

4 KESIMPULAN

Untuk wilayah Indonesia densitas BC berfluktuasi dari nilai terendah $\sim 2 \times 10^{-7}$ kg/m² sampai nilai BC $\sim 38 \times 10^{-7}$ kg/m². Dari tren

distribusi bulanan untuk rata-rata wilayah Indonesia pada umumnya ditemukan nilai BC yang tinggi rata-rata terjadi pada bulan September dan Oktober yang diperkirakan berkaitan dengan peristiwa kebakaran hutan di Sumatera dan Kalimantan.

Pada peristiwa kebakaran hutan yang terjadi pada tahun 2002, 2006 dan 2015 diperkirakan memberikan kontribusi BC tertinggi dengan densitas masing-masing sebesar $23,4 \times 10^{-7}$ kg/m², $36,91 \times 10^{-7}$ kg/m² dan $37,83 \times 10^{-7}$ kg/m². BC pada tahun 2015 adalah BC tertinggi yang ditemukan selama perioda data 2001-2015.

Kebakaran hutan gambut di Kalimantan dan Sumatera juga telah berkontribusi pada peningkatan BC di perkotaan. Dari hasil analisis rata-rata bulanan pada bulan September dan Oktober 2015 terjadi peningkatan jumlah sebaran titik panas di Kalimantan Tengah masing-masing 12327 dan 11252 titik panas, dan pada saat yang sama data BC di Palangkaraya juga mengalami peningkatan sampai sekitar $1,35 \times 10^{-5}$ – $2,01 \times 10^{-5}$ kg/m².

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima penulis ditujukan kepada rekan-rekan terutama kepada Indah Susanti, yang telah banyak menyumbangkan pemikiran yang sangat bermanfaat sehingga makalah ini dapat diselesaikan. Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada Kementerian Kehutanan yang telah memberikan ijin penggunaan data *hotspots* (titik panas) dalam tulisan ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Ackerman, A. S., O. B. Toon, D. E. Stevens, A. J. Heymsfield, V. Ramanathan, E.J. Welton, 2000: Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science* 288, 1042–1047.
- AMAP, 2011. *The Impact of Black Carbon on Arctic Climate*. By: P. K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J. F. Burkhardt, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, and V. Vestreng. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, 72 pp.
- Babu, S. S., K. K. Moorthy, 2001: Anthropogenic impact on aerosol black carbon mass concentration at a tropical coastal station: a case study. *Current Science* 81, 1208 –1214.
- Beegum, S.N., K. Krishna Moorthy, S.S. Babu, S.K. Satheesh, V. Vinoj, K.V.S. Badarinath, P.D. Safai, P.C.S. Devara, S. Singh, Vinod, U. C.

- Dumka, P. Pant, 2009: Spatial distribution of aerosol black carbon over Indis during pre-monsoon season, *Atmospheric Environment* 43, 1071-1078, doi:10. 1016/j. atmosenv. 2008. 11. 042
- BNPB, 2015. Dampak EL-Nino Tahun 2015 terhadap Kekeringan di Indonesia, <http://www.bnpb.go.id/berita/2554/dampak-el-nino-tahun-2015-terhadap-kekeringan-di-indonesia>
- Bond, T. C. , D. G. Streets, K. F. Yarber, 2004: A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J. Geophys. Res.* , 109(14203), doi: 10. 1029/2003JD003697.
- Bond, T. C. , E. Bhardwaj, and R. Dong, 2007: Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000. *Global Biogeochem. Cycles*, 21, doi: 10. 1029/2006GB002840.
- Bond, T., 2007: 'Testimony for the Hearing on Black Carbon and Climate Change', Testimony to the House Committee on Oversight and Government Reform, 16 pp .
- Cao, G., X. Zhang, and Y. Wang, 2006: Inventory of black carbon emission from China. *Adv. Clim. Change Res.* (in Chinese), 2(6), 259-264.
- Chung, S.H., J. H. Seinfeld, 2005: Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon. *Journal of Geophysical Research* 110, D11102. doi: 10. 1029/2004JD005441.
- Corrigan, C. E., G.C. Roberts, M.V. Ramana, D. Kim, V. Ramanathan, 2007: Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 7, 11429–11463.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, V. Oinas, 2000: Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, NASA, vol. 97, no. 18, 9875–9880 pp, DOI: 10. 1073/pnas. 170278997.
- Husain, L. , Dutkiewics, V. A. , Khan, A. J. , Ghauri, B. M. , 2007: Characterization of carbonaceous aerosols in urban air. *Atmospheric Environment* 41, 6872–6883.
- 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. dkk., Eds. , Cambridge University press, 996pp.
- Jacobson, M. Z. , 2001: Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature* 409, 695–697.

- Kementerian Lingkungan Hidup, Republik Indonesia (KLH), 2006: Press Release Pengendalian Kebakaran Hutan Dan Lahan Kementerian Lingkungan Hidup, 1 September 2006, [http://www.menlh.go.id/press-release-pengendalian-kebakaran hutan-dan-lahan kementerian-lingkungan-hidup/](http://www.menlh.go.id/press-release-pengendalian-kebakaran-hutan-dan-lahan-kementerian-lingkungan-hidup/)
- Kementerian Lingkungan Hidup (KLH), 2014: Pengaruh El Nino Pada Kebakaran Hutan Dan Lahan, Deputi Bidang Pengendalian Kerusakan Dan Perubahan Iklim, Kementerian Lingkungan Hidup, <http://www.menlh.go.id/>
- LAPAN, 2016: Hotspots Information, as Forest/Land Fire's Alert, <http://modis-catalog.lapan.go.id/monitoring/>
- Lohmann, U. , Feichter, J. , Penner, J. E. , Leitch, W. R. , 2000: Indirect effect of sulfate and carbonaceous aerosols: a mechanistic treatment. *Journal of Geophysical Research* 105, 12193–12206.
- NASA, 2016: Black Carbon Column Massa Density, Giovanni, http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&bbox=-180,-90,180,90&data=M2TMNXAER_5_12_4_BCCMASS&variableFacets=dataFieldDiscipline%3AAerosols%3BdataFieldMeasurement%3ABlack%20Carbon%3B
- Ramanathan, V., and G. Carmichael, 2008: Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature*, 1, 221-227.
- Steiner, A. , 2009: A Major Scientific Study on Black Carbon Intercomparison. Black Carbon e-Bulletin, The United Nations Environment Programme (UNEP) in collaboration with the Science Team of Atmospheric Brown Cloud (ABC), Volume 1, Number 2.
- Sofiati, I., Sinatra, T. , 2012: Analisis polutan saat kebakaran hutan serta kaitannya dengan fenomena ElNino di Palangkaraya-Kalimantan Tengah, *Lingkungan Tropis*, Vol 6, No. 1, 41-50.
- Susanto A., 2015. Apa yang paling banyak menyebabkan kebakaran hutan di Indonesia?, <http://www.rappler.com/indonesia/104764-kebakaran-hutan-indonesia-cifor>
- Zhang, H. , and Z. Wang, 2011: Advances in the Study of Black Carbon Effects on Climate. *Advances in Climate Change Research* 2(1), 23-30. DOI: 10.3724/SP.J.1248.2011.00023.