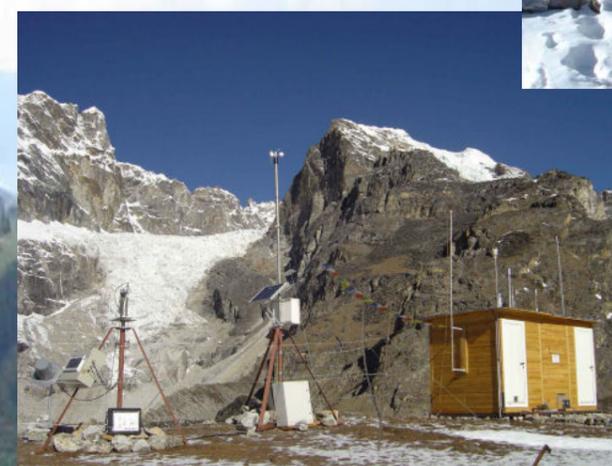


Vol. 1 No. 4 Desember 2010

ISSN 2086-5589

MEGASAINS

Buletin Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, Geofisika, dan Lingkungan



MEGASAINS © 2010

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang
Telp. (0752) 7446089 / Fax. (0752) 7446449
e-mail: stagaw.kototabang@bmg.go.id

ISSN 2086-5589



9 772086 558003



Diterbitkan oleh:

STASIUN PEMANTAU ATMOSFER GLOBAL BUKIT KOTOTABANG
Jl. Raya Bukittinggi – Medan Km. 17 Palupuh Sumatera Barat

MEGASAINS

Buletin Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, Geofisika, dan Lingkungan

Vol. 1 No. 4 Desember 2010

Diterbitkan Oleh :

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

Jl. Raya Bukittinggi-Medan Km.17 Palupuh Sumatera Barat

PENANGGUNG JAWAB

Drs. Herizal, M.Si.

REDAKTUR

Sugeng Nugroho, M.Si.

Dra. Nurhayati, M.Sc.

Dr. Hamdi Rivai

Dr. Edwin Aldrian, B.Eng, M.Sc.

EDITOR

Asep Firman Ilahi, Ah. MG

Alberth Christian Nahas, S.Si

Firda Amalia Maslakah, S.Si

DESIGN LAYOUT

Edison Kurniawan, M.Si

Agusta Kurniawan, M.Si

SEKRETARIAT

Irwin. A

Carles, ST

Budi Satria, A.Md

Darmadi, A. Md

Budi Setiawan, ST

MEGASAINS

Megasains merupakan buletin yang diterbitkan oleh Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit kototabang sebagai media penuangan karya ilmiah yang bersumber dari kegiatan penelitian berbasis ilmu-ilmu meteorologi, klimatologi, kualitas udara, dan geofisika (MKKuG), serta lingkungan.

Dewan redaksi membuka kesempatan bagi para pakar ataupun praktisi untuk dapat mengirimkan karya ilmiah, terutama yang berkaitan dengan tema MKKuG dan lingkungan.

Naskah karya tulis yang dikirimkan hendalnya asli dan belum pernah dipublikasikan. Naskah diketik menggunakan aplikasi MS Word dengan ketentuan panjang naskah antara 5 sampai 15 halaman ukuran A4; batas kiri 4 cm, kanan 3,17 cm, atas dan bawah 2,54 cm; satu kolom; font Arial; judul ditulis menggunakan font 12 pts, rata tengah, spasi tunggal, huruf kapital, dan cetak tebal; isi ditulis menggunakan font 10 pts, rata kirikan, dan spasi tunggal; tulisan disertai dengan abstrak 1 alinea, ditulis dengan font 10 pts, cetak miring, spasi tunggal, dan disertai 2-5 kata kunci.

Redaksi berhak mengubah isi naskah sepanjang tidak mengubah substansinya. Isi naskah adalah sepenuhnya tanggung jawab penulis. Pemilihan naskah yang laik cetak adalah sepenuhnya hak redaksi.

Softcopy naskah dikirimkan ke

Alamat Redaksi:

PO BOX 11 Bukittinggi 26100

e-mail: stagaw.kototabang@bmg.go.id

Gambar Sampul:

Global GAW Pyramid

Mount Everest, Nepal

Dari Redaksi

Pembaca yang kami banggakan,

Puji dan Syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang dapat kembali menerbitkan Buletin MEGASAINS.

Menginjak edisi terakhir dari Volume 1 penerbitan Buletin MEGASAINS ini, redaksi mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh penulis yang telah memberikan kontribusi karya tulis ilmiahnya selama tahun pertama Buletin ini. Pada edisi kali ini, MEGASAINS memuat enam karya tulis ilmiah dalam bidang Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, dan Geofisika. Topik utama dari beberapa karya tulis ini diantaranya adalah hasil verifikasi pemodelan, fenomena meteorologi, dan kualitas udara pasca letusan Gunung Sinabung yang sempat menyita perhatian publik.

Dengan ditunjang oleh semangat dari seluruh staf Stasiun GAW Bukit Kototabang di dalam dukungannya terhadap kesinambungan penerbitan MEGASAINS, Redaksi tentu sangat berharap hasil-hasil penelitian ini dapat mendorong terciptanya peningkatan pelayanan MKKuG di masa yang akan datang. Disamping itu, munculnya kesadaran di dalam melakukan kaidah penelitian, diharapkan akan menunjang bagi peningkatan pengetahuan serta kinerja di dalam pelaksanaan tugas sehari-hari.

Tak ada gading yang tak retak, demikian pula kiranya terbitan MEGASAINS ini yang masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, Redaksi sangat berharap saran dan masukan yang membangun demi kesempurnaan MEGASAINS di kemudian hari.

Akhirnya, Redaksi mengucapkan selamat membaca dan semoga bermanfaat.

Bukit Kototabang, Desember 2010

Daftar Isi

	halaman
Susunan Redaksi	iii
Dari Redaksi	iv
Daftar Isi	v
DISTRIBUSI SPASIAL DAN TEMPORAL SEISMOTEKTONIK WILAYAH SUBDUKSI JAWA <i>Supriyanto Rohadi</i>	180 - 188
ANALISIS TRAYEKTORI ASAP KEBAKARAN HUTAN DI KALIMANTAN TAHUN 2006 MENGGUNAKAN <i>THE AIR</i> <i>POLLUTION MODEL</i> <i>Guswanto, Dicky Fajar Anugrah, Ana Turyanti, dan Eko Heriyanto</i>	189 - 208
VARIABILITAS DATA RADIASI MATAHARI DALAM INTERVAL PENDEK DI STASIUN PEMANTAU ATMOSFER GLOBAL BUKIT KOTOTABANG <i>Herizal, Yosfi Andri, dan Alberth Christian Nahas</i>	209 - 217
PENGARUH LETUSAN GUNUNG SINABUNG TERHADAP PENGUKURAN DEPOSISI ASAM DI BUKIT KOTOTABANG <i>Agusta Kurniawan</i>	218 – 229
STUDI SENSITIVITAS SKEMA LAPISAN ATAS PLANETER DALAM SIMULASI PARAMETER ANGIN (STUDI KASUS WILAYAH PANTAI UTARA PAPUA) <i>Rully Affandi</i>	230 – 238
EFEK ANGIN TERHADAP KONSENTRASI POLUTAN TERUKUR KARBON MONOKSIDA DI BUKIT KOTOTABANG (STUDI KASUS TANGGAL 7-24 FEBRUARI 2010) <i>Asep Firman Ilahi</i>	239 – 249

DISTRIBUSI SPASIAL DAN TEMPORAL SEISMOTEKTONIK WILAYAH SUBDUKSI JAWA

Supriyanto Rohadi

Balai Besar Meteorologi dan Geofisika Wilayah II Jakarta
e-mail: srohadi@yahoo.com

ABSTRACT

Gutenberg-Richter relation is $\log N = a - b M$, the slope of this relation describes the size distribution of earthquakes. High b -value indicates a relatively large proportion of small earthquakes, while high a -value indicates a high level of earthquake activity. Maximum likelihood method was used to determining these parameters, because it can reduce the bias of the b -value. We used NEIC earthquake catalogue (National Earthquake Information Center) and the BMKG catalogue (Climatology Meteorology and Geophysics agency) from 1973 to 2009 to analyzing the distribution of seismotectonic parameter in Java, ($6.5^{\circ}\text{S} - 12^{\circ}\text{S}$ and $105^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$). The results show that ranges of b -value variation of is from 0.5 to 2.3, variations in the a -values from 4 to 13 and identified zone with low seismicity (seismic gap) in around south of East Java. Return period of earthquake with magnitude 6.5 is about 8 to 37 years.

Keywords: *Seismotectonic, Gutenberg-Richter relation, b -value*

PENDAHULUAN

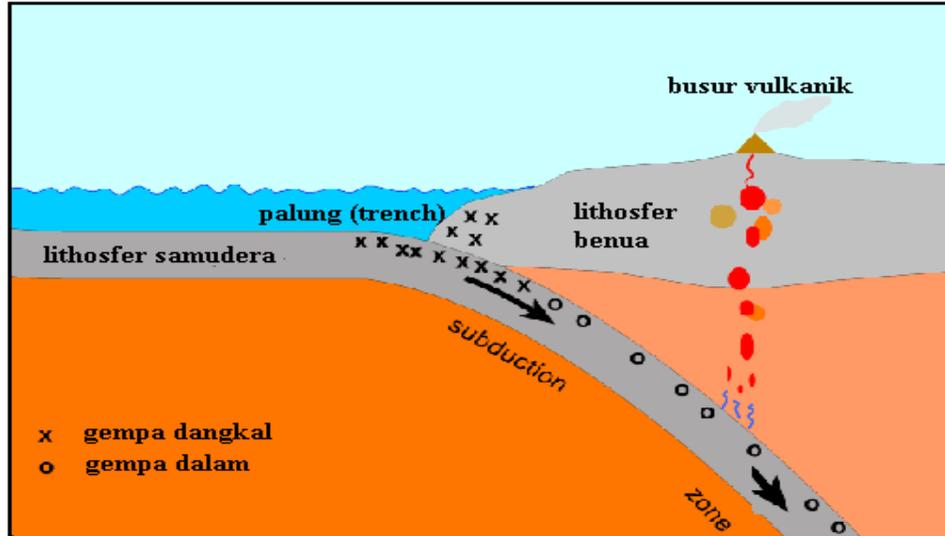
Tektonik Jawa didominasi oleh tunjaman ke utara lempeng Australia dibawah lempeng Sunda yang relatif diam dan diperkirakan kecepatan pergerakannya 6 cm/th dengan arah mendekati normal terhadap palung (Gambar 1). Lempeng Australia menunjam dengan kedalaman 100-200 km dibawah pulau Jawa dan 600 km di utara Jawa. Konsekuensi tunjaman lempeng tersebut mengakibatkan kegempaan yang tinggi dan lebih dari 20 gunung api aktif di zona ini.

Zona subduksi merupakan wilayah yang menarik bagi para ahli kebumihan, terutama karena zona ini berpotensi untuk terjadinya gempa besar. Gempa besar tidak hanya merusak kawasan disekitar gempa tersebut tetapi juga dapat menimbulkan tsunami yang dapat mengakibatkan bencana di wilayah yang jauh dari sumber gempa. Dalam kurun waktu 6 tahun terakhir beberapa gempa bumi besar telah terjadi di wilayah Indonesia. Aktivitas kegempaan pada dekade ini memang lebih aktif bila dibandingkan kegempaan dekade sebelumnya berdasarkan katalog kegempaan. Gempa-gempa tersebut pada merupakan dampak dari pergerakan lempeng Indo-Australia yang relatif bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam. Gempa bumi besar yang terjadi di wilayah Jawa, antara lain: gempa Banyuwangi 1994, gempa Yogyakarta, 27 Mei 2006, dengan episenter 8.26°LS , 110.31°BT , magnitudo 5.9 dan gempa Pangandaran 17 Juli 2006, episenter 9.46°LS , 107.19°BT , magnitudo 6.8. Gempa Tasikmalaya tanggal 2 September 2009, magnitudo 7.0.

Penelitian variasi spasial nilai- b telah dilakukan oleh beberapa peneliti di sejumlah daerah aktif gempa di dunia, ditemukan adanya hubungan nilai- b dan aktivitas stress lokal. Secara statistik perubahan nilai- b yang signifikan telah teramati di beberapa *regime stress* seperti di zona subduksi lempeng (Monterroso and Kulhánek, 2003), di sepanjang zona patahan dan di zona *foreshock* (Molchan *et al.*, 1999), variasi b -values terhadap ruang dan waktu telah diteliti dalam berbagai penelitian seismisitas (Aki, 1965; Carter and Berg, 1981; Gutenberg and Richter, 1942). Penelitian akhir-akhir ini diantaranya untuk mengidentifikasi volume dari magma aktif (Kagan, 1999; Mogi, 1962), akar dari vulkanisme regional (Molchan and Dmitriev, 1990) dan untuk memperkirakan gempa bumi dari tektonik mayor (Molchan *et al.*, 1999; Monterroso, 2003).

Parameter seismo-tekonik suatu wilayah dapat diketahui dari relasi Gutenberg-Richter atau *magnitude-frequency relation* (MFR) (Gutenberg and Richter, 1942) yang dituliskan sebagai

$$\log n(M) = a - bM \quad (1)$$



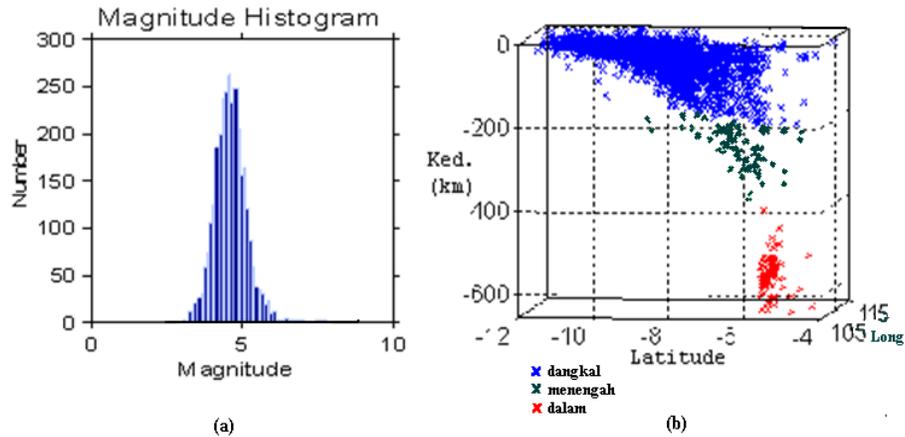
Gambar 1. Penampang Zona Subduksi

dimana $n(M)$ adalah jumlah gempa bumi dengan magnitudo M , a dan b adalah jumlah konstanta. Nilai- a merupakan parameter seismik yang besarnya bergantung banyaknya gempa dan untuk wilayah tertentu bergantung pada penentuan volume dan *time window*. Nilai- b biasanya mendekati 1 merupakan parameter tektonik yang menunjukkan jumlah relatif dari getaran yang kecil dan yang besar.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah mendiskusikan karakteristik dari nilai- b , teknik evaluasinya dan penerapannya pada prediktabilitas gempabumi. Distribusi parameter seimotektonik secara spasial dan temporal diharapkan dapat sedagai identifikasi potensi gempa bumi di zona subduksi Jawa.

METODE PENELITIAN

Data menggunakan data gempa bumi dari katalog NEIC dan BMG di zona subduksi Jawa meliputi batas 6.5° LS - 12° LS dan 105° BT - 115° BT, berjumlah 3036, dengan kedalaman 0-655 km untuk kurun waktu Januari 1973 - Oktober 2009. Pada Gambar 2a ditunjukkan histogram magnitudo terhadap kedalaman, gempa dengan magnitudo diatas 4,5 lebih dari 250 gempa, Gambar 2b irisan plot kegempaan.



Gambar 2. a) Histogram data kegempaan di wilayah Jawa. b) Penampang irisan plot kegempaan yang menggambarkan subduksi di wilayah Jawa.

Parameter seismotektonik yang merupakan konstanta dari relasi Gutenberg-Richter dapat ditentukan dengan metode *least square* atau maksimum *likelihood*. Metode maksimum *likelihood* menggunakan persamaan yang diberikan Utsu (1967), yaitu

$$b = \frac{\log e}{\overline{M} - M_{\min}} = \frac{0.4343}{\overline{M} - M_{\min}} \tag{2}$$

dimana \overline{M} adalah magnitudo rata-rata dan M_{\min} adalah magnitudo minimum. Dengan standar deviasi dihitung menggunakan formula (Shi and Bolt, 1982), sebagai berikut:

$$\delta b = 2.30b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M})^2 / n(n-1)} \tag{3}$$

Dimana n adalah jumlah data. Nilai-a ditentukan dari menggunakan formula berikut

$$a = \log N(M \geq M_0) + \log(b \ln 10) + M_0 b \tag{4}$$

Jumlah gempa bumi per tahun secara teoritis dihitung dengan membagi nilai-a dengan periode observasi (T) yaitu $a_1 = a / \log T$, dimana T adalah tahun, Jumlah frekuensi kumulatif gempa bumi per tahun atau disebut indeks seismisitas adalah

$$N_1(M) = 10^{a_1 - bM} \tag{5}$$

Dengan diperoleh $N_1(M)$ dapat dihitung nilai rata-rata periode ulang dari gempa bumi merusak yaitu :

$$\theta = \frac{1}{N_1(M)} \text{ tahun} \tag{6}$$

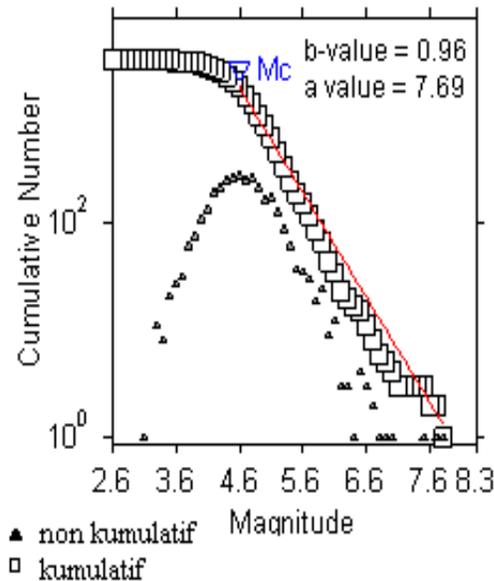
dimana θ adalah periode ulang. Perhitungan Nilai-b dalam analisis ini menggunakan metode *maximum likelihood* dengan M_c dipilih kombinasi terbaik antara magnitudo minimum dan 95% *confidence interval*.

Tahapan dalam pengolahan data meliputi: Seleksi data dan penyeragaman magnitudo, Plot distribusi frekuensi magnitudo untuk melihat kelengkapan data sehingga diketahui nilai magnitudo kompletnessnya (M_c), *decluster* katalog untuk menghilangkan pengaruh *foreshock* dan *aftershock*, perhitungan nilai-b, nilai-a, periode ulang menggunakan program ZMAP (Wiemer and Wyss, 2002). Validasi dan analisis distribusi nilai-b terhadap ruang dan waktu. Untuk memetakan nilai-b secara spasial, wilayah penelitian dibagi menjadi grid-grid dan nilai-b dihitung untuk tiap titik grid. Dengan menggunakan metode ini, radius divariasikan terhadap jumlah gempa tertentu di wilayah tersebut. Dalam penelitian ini dipilih jumlah gempa $N=70$ atau radius konstan 110 km dan grid pengolahan data $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Untuk menentukan variasi nilai-b terhadap waktu,

digunakan metode *sliding window* waktu. Sekumpulan gempa bumi yang dipilih dari katalog gempa bumi. Nilai-b dihitung menggunakan N gempa. Selanjutnya, *window* digeser berdasar waktu sesuai dengan jumlah gempa tertentu, misal N/10 gempa. Nilai-b dihitung untuk sekumpulan data gempa dan prosedur ini diulang hingga data gempa terakhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi frekuensi-magnitudo diperlihatkan pada Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat *slope* atau nilai-b dari relasi Gutenberg-Richter yang dihitung menggunakan metode maksimum *likelihood*, secara umum diperoleh sekitar 0.96 dan nilai-a adalah 7.69. Nilai-b ini tidak berbeda jauh dengan nilai-b di wilayah Circum Pasific (Carter and Berg, 1981) (Tabel 1). Faktor penting dalam menentukan nilai-b dan nilai-a adalah magnitudo *completeness* (M_c), sehingga diperlukan deskripsi akurat dari M_c lokal. M_c ini dapat diperoleh dengan cukup akurat dari data observasi dengan mengasumsikan sebuah *power-law distribution* sehingga kehilangan data diujung katalog dapat dimodelkan. Nilai M_c di wilayah penelitian seperti pada Gambar 3 dimana M_c sekitar 4.6. Besarnya M_c ini sangat berpengaruh terhadap penentuan nilai-b dengan metode maksimum *likelihood*.



Gambar 3. Distribusi Frekuensi-Magnitudo (FMD) dari Kegempaan di Wilayah Jawa Januari 1973 - Oktober 2009

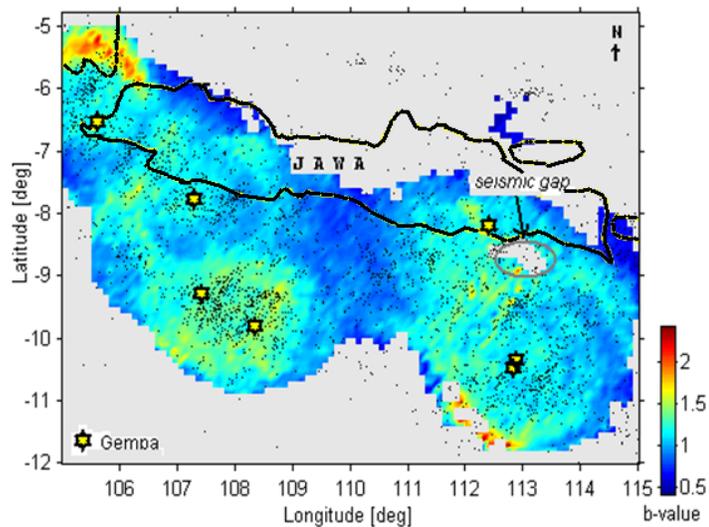
Tabel 1. Nilai b Circum Pasifik (Carter dan Berg, 1981)

Region	b-value
South America	0.80
Kermadec	0.97
Tonga	0.95
New Hebrides	0.80
Kuril	0.82
Kamchatka	0.95
W. Alcutians	0.84
E. Alcutians	0.88

Distribusi *spasial* nilai-b di wilayah penelitian tampak pada Gambar 4 dimana minimum nilai-b sekitar 0.5 hingga 2.3. Bagian wilayah dengan nilai-b yang rendah biasanya berkorelasi dengan tingkat stress yang tinggi, sedangkan nilai-b tinggi sebaliknya. Hal ini berarti bahwa wilayah dengan nilai-b yang rendah berpotensi lebih besar akan terjadi gempa bumi. Selain itu, wilayah dengan heterogenitas yang besar berkorelasi dengan

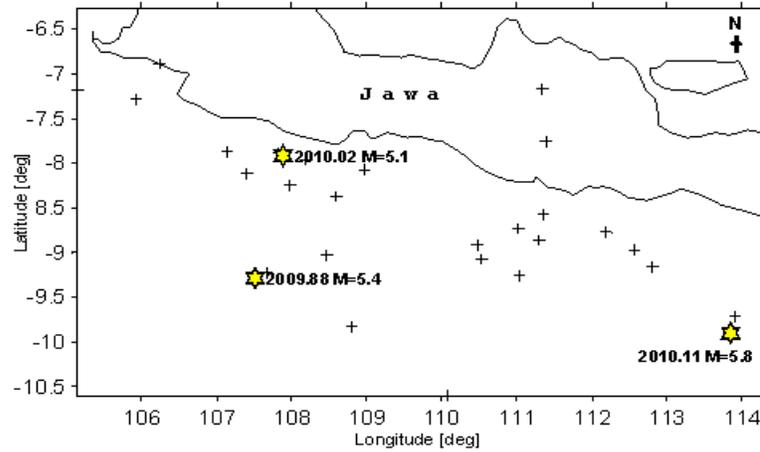
nilai-b yang tinggi (Molchan *et al.*, 1999). Hal ini berarti bahwa wilayah dengan nilai-b yang lebih rendah dibanding dibandingkan nilai-b di wilayah sekitarnya maka batuanannya lebih homogen.

Distribusi spasial nilai-b berdasarkan data gempa bumi dari Januari 1973 hingga Oktober 2009, yang selanjutnya divalidasi dengan data gempa bumi dari bulan Oktober 2009 hingga April 2010, pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa pada interval bulan tersebut telah terjadi beberapa gempa bumi pada daerah dengan nilai-b yang relatif besar. Hal ini bertentangan dengan pendapat peneliti sebelumnya dimana makin rendah nilai-b semakin berpeluang terjadi gempa bumi dan dapat dipahami karena daerah wilayah dengan nilai-b rendah merupakan wilayah dimana terjadi terakumulasi stress yang belum dilepaskan. Pola distribusi nilai-b (Gambar 4) dan nilai-a memiliki kesesuaian (Gambar 6a) dimana wilayah dengan nilai-b yang tinggi bersesuaian dengan wilayah dengan nilai-a yang tinggi. Pada Gambar 4 tampak wilayah dengan nilai-b rendah yaitu di Samudera Hindia bagian selatan Jawa Tengah, sedangkan nilai-b yang relatif tinggi di sekitar selat Sunda, nilai-b yang tinggi ini dapat diinterpretasikan wilayah selat Sunda memiliki aktivitas kegempaan yang relatif lebih tinggi tetapi dengan magnitude yang tidak besar.

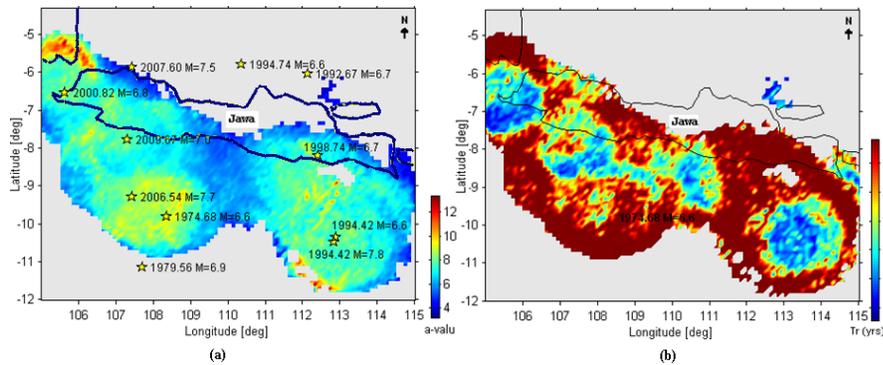


Gambar 4. Distribusi nilai-b di wilayah Jawa dari katalog *NEIC* tahun 1973-2009

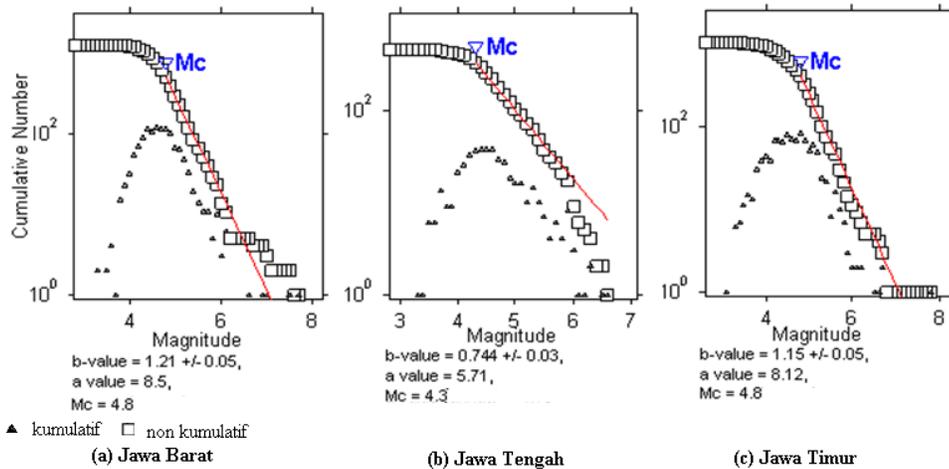
Pada Gambar 4 dan 6 a,b juga tampak adanya wilayah yang memiliki gap kegempaan dibanding wilayah sekitarnya, yaitu zona di Samudera Hindia selatan Jawa Timur. Wilayah dengan gap kegempaan ini memiliki potensi relatif lebih besar untuk terjadi gempa besar dibanding wilayah lain. Gambar 6b ditunjukkan distribusi periode ulang gempa bumi dengan magnitude 6.5 dimana nilainya bervariasi dari 8 hingga 37 tahun. Periode ulang yang pendek biasanya berkorelasi dengan nilai-b dan nilai-a yang tinggi. Beberapa wilayah memiliki periode ulang gempa yang pendek dengan aktivitas kegempaan relatif tinggi seperti Selat Sunda, wilayah Samudera Hindia sebelah selatan Jawa Barat, selatan Jawa Tengah dan sebagian wilayah selatan Jawa Timur.



Gambar 5. Gempa bumi yang terjadi setelah bulan Oktober 2009 sebagai validasi



Gambar 6. a) Distribusi nilai-a, b) Periode ulang gempa bumi M=6.5 tampak variasi periode ulang berkisar 8 hingga 37 tahun.

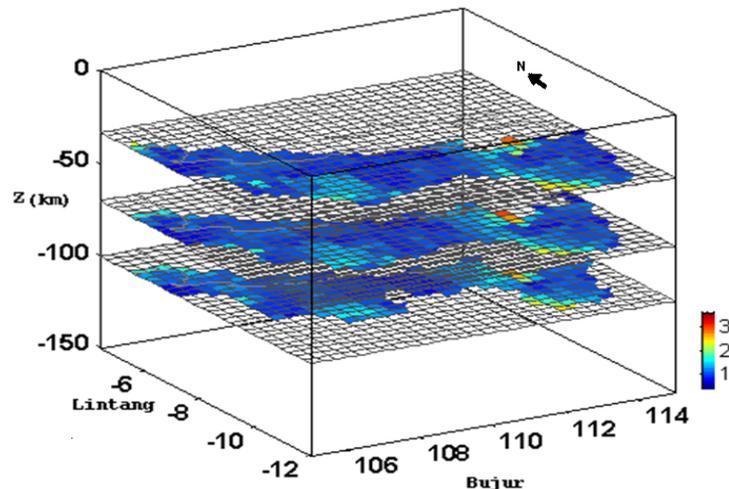


Gambar 7. Plot kumulatif gempa vs magnitudo di tiga bagian wilayah yaitu Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur.

Pada Gambar 7 ditunjukkan perbandingan nilai parameter seismotektonik dan magnitudo completeness antara Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur. Pada Gambar 7. ditunjukkan bahwa nilai-b di Jawa Barat yaitu 1.21 adalah tertinggi diantara dua wilayah lainnya, Jawa Tengah (0.744) dan Jawa Barat (1.15). Dari besar nilai-b dan nilai-a ini dapat disimpulkan bahwa wilayah Jawa Barat merupakan paling aktif gempa

disusul Jawa Timur dan Jawa Tengah. Magnitude *completeness* Jawa Barat dan Jawa Timur adalah sama yaitu 4.6 sedangkan Jawa Tengah 4.3, hal ini berarti bahwa gempa-gempa dengan magnitude 4.3 tercatat dengan lengkap di Jawa Tengah, sedangkan untuk Jawa Barat dan Jawa Timur magnitude terkecil gempa yang tercatat adalah 4.8.

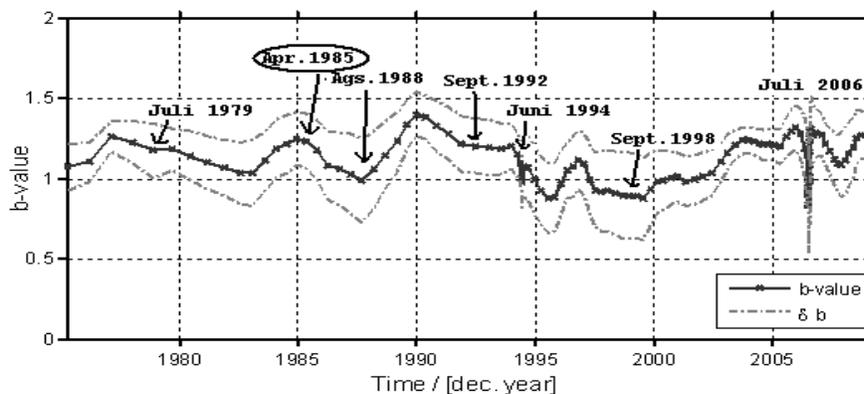
Distribusi spasial nilai-*b* terhadap kedalaman dihitung dengan ukuran *sample window* 100, *overlap* 4, *Mc* menggunakan maksimum *curvature*. Pada Gambar 8, terlihat bahwa distribusi nilai-*b* konsisten terhadap kedalaman, dimana ditemukan nilai-*b* relatif tinggi di sebelah selatan Jawa Timur. Nilai-*b* yang tinggi ini dapat disimpulkan bahwa di wilayah ini batuan bersifat heterogen dan relatif banyak terjadi gempa dengan magnitude kecil, sehingga kurang berpotensi terjadi gempa besar karena akumulasi energi telah dilepaskan secara periodik.



Gambar 8. Distribusi nilai-*b* pada kedalaman 33 km, 70 km dan 100 km di wilayah Jawa dari Katalog NEIC 1973-2009

Penelitian variasi spasial nilai-*b* telah dilakukan oleh beberapa peneliti di sejumlah daerah aktif gempa. Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa nilai tersebut tidak bervariasi secara sistematis pada berbagai regim aktif gempa, tetapi beberapa peneliti lain menunjukkan bahwa nilai-*b* bervariasi secara signifikan di beberapa zona patahan (Shi and Bolt, 1982; Utsu, 1967) dan juga pada tempat dan jangka waktu tertentu (Nuannin *et al.*, 2005). Selain itu, nilai-*b* memiliki hubungan yang kuat terhadap stress di dalam suatu volume batuan (Wiemer and Wyss, 2002). Dari pengamatan variasi ruang nilai-*b*, diketahui bahwa nilai-*b* mencerminkan aktivitas *stress* lokal, dimana secara statistik perubahan nilai-*b* yang signifikan telah teramati di beberapa *regime stress* seperti zona subduksi lempeng, zona patahan dan di zona *aftershock*.

Penelitian yang sistematis telah dilakukan untuk menguji potensi perubahan secara temporal sebagai *precursor* gempa bumi jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang. Pada Gambar 9 ditunjukkan distribusi temporal nilai-*b* secara temporal berkisar antara 0.8-1.3. Dari hasil ini menunjukkan adanya penurunan nilai-*b* sebelum gempa bulan September 1992, gempa Banyuwangi pada bulan Juni 1994, gempa pada bulan April 1985 dan September 1998 tetapi justru terdapat kenaikan nilai-*b* sebelum gempa Pangandaran pada bulan Juli 2006. Hal ini dapat disimpulkan bahwa *trend* distribusi nilai-*b* secara temporal tidak konsisten sebelum gempa besar. Beberapa hasil penelitian ahli kegempaan menunjukkan bahwa gempa besar sering didahului peningkatan nilai-*b* pada jangka menengah, diikuti penurunan pada beberapa minggu hingga bulan sebelum gempa bumi (Schorlemmer *et al.*, 2004). Penelitian variasi temporal nilai-*b* untuk *foreshock* selama beberapa hari sebelum gempa utama menemukan, berdasarkan katalog regional dan global, bahwa nilai-*b* menurun hingga 50% dari *foreshock*-nya (Monterroso, 2003; Monterroso and Kulhánek, 2003). Dengan menggunakan data gempa bumi untuk Amerika Tengah menemukan bukti yang mendukung hypothesis bahwa nilai-*b* menurun secara signifikan sebelum terjadinya gempa besar (Sammonds *et al.*, 1992).



Gambar 9. Distribusi temporal nilai-b.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penentuan distribusi seismotektonik di wilayah Jawa dapat disimpulkan bahwa nilai-b wilayah subduksi Jawa berkisar antara 0.5 - 2.3, sedangkan nilai-a berkisar 4 - 13, distribusi nilai ini menunjukkan zona subduksi Jawa merupakan wilayah aktif gempa besar, sedangkan periode ulang gempa dengan magnitude 6.5 bervariasi antara 8 hingga 37 tahun. Dari perbandingan nilai parameter seismotektonik diperoleh bahwa nilai-b di Jawa Barat (1.21) tertinggi diantara dua bagian wilayah lainnya, Jawa Tengah (0.744) dan Jawa Barat (1.15). Dari besar nilai ini dapat disimpulkan bahwa wilayah Jawa Barat merupakan paling aktif gempa dibanding Jawa Timur dan Jawa Tengah. Adanya zona gap kegempaan di sekitar selatan Jawa Timur yang dapat disimpulkan wilayah ini berpotensi terjadi gempa besar di waktu yang akan datang. Dari analisis distribusi temporal diperoleh bahwa adanya *trend* menurun sebelum terjadinya beberapa gempa besar tetapi *trend* distribusi nilai b sebelum gempa besar adalah tidak konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. 1965, Maksimum likelihood estimate of b-values in the formula $\log N = A - bM$ and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokio Univ.* 43, 237- 240.
- Carter, J.A and Berg (1981): Relative stress variation determined by b-value from earthquakes in Circum-pacific subduction zones. *Tectonophysics*, 76, 257-271.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1942. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 32: 163-191.
- Kagan, Y., 1999. The universality of the frequency-magnitude relationship. *Pure and Appl. Geophys.*, 155: 537-574.
- Mogi, K., 1962. Magnitude-frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 40: 831-883.
- Molchan. G.M., and O. Dmitriev (1990), Dynamics of magnitude-frequency relation of foreshocks, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 61, 99-112.
- Molchan, G.M., T.L. Kronrod, and A.K Nekrasova (1999), Immediate foreshocks: time variation of the b-value, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 111, 229-240.
- Monterroso, D. (2003), Statistical seismology studies in Central America: b-value, seismic hazard and seismic quiescence, *Compr. Summaries Uppsala Diss. Fac. Sci. Technol.* 897, 27 pp., Acta Univ. Upsaliensis, Uppsala, Sweden.
- Monterroso, D.A., and O. Kulhánek (2003), Spatial variations of b-values subduction zone of Central America, *Geofisica Int.*, 42(4), 1-13.

- Nuannin, P.-, Kulhanek, O. and Persson, L., 2005. Spasial and temporal *b* value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L11307.
- Sammonds, P.R., P.G. Meredith, and I.G. Main (1992), Role of pore fluid in the generation of seismic precursors to shear fracture, *Nature*, 359, 228-230.
- Schorlemmer, D., G. Neri, S. Wiemer, and A. Mostaccio (2003), Stability and significance tests for *b*-values anomalies: example from the Tyrrhenian Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (16), 1835, doi10.1029 /2003GL017335.
- Schorlemmer, D., S. Wiemer, and M. Wyss (2004), Earthquake statistics at Parkfield I: Stationarity of *b*-values, *J. of Geophys. Res.* 109, B12307, doi10.1029 /2004-JB003234.
- Shi, Y., and B.A. Bolt (1982), The standard error of the magnitude-frequency *b*value, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1677-1687.
- Utsu, T. (1967) Statistical significance of test of the difference in *b* value between two earthquake groups, *J. Phys. Earth*, 14, 37-40, 1974.
- Scholz, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58: 399-415.
- Wiemer S., and M. Wyss, (2002), Mapping spasial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Adv. Geophys.*, 45, 259–302.

ANALISIS TRAYEKTORI ASAP KEBAKARAN HUTAN DI KALIMANTAN TAHUN 2006 MENGGUNAKAN *THE AIR POLLUTION MODEL (TAPM)*

Guswanto¹, Dicky Fajar Anugrah², Ana Turyanti², dan Eko Heriyanto³

¹ Balai Besar BMKG Wilayah II Ciputat, e-mail: guswantobmg@gmail.com

² Jurusan Geometeorologi, FMIPA Institut Pertanian Bogor

³ Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

ABSTRACT

Wildfires can be a major source of some air pollutants, such as carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxide (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and particles (PM₁₀ and PM_{2.5}). Meteorological parameters played significant role on affecting pollutant concentration. Air temperature, wind speed, wind direction, humidity, precipitation, and mixing height were among the parameters that influenced how air pollutants affected the ambient air. The aim of this research was to estimate the emission rate of each air pollutant in certain months of 2006 by using The Air Pollution Model (TAPM). Data being used were developed by GFEDv 2. Trajectory of these pollutants was also simulated by TAPM. Results showed that the highest emission rate was occurred in September 2006, with rates for PM_{2.5}, NO_x, and CO were 81.18 g s⁻¹, 17.06 g s⁻¹, and 144.65 g s⁻¹, respectively. September 2006 became the month which wildfire reached its peak. Meanwhile, May and December 2006 were marked as the lowest emission rate due to high precipitation that reduced the hotspot number. Atmospheric stability and mixing height that were affected by meteorological parameters showed that pollutant concentrations varied between day and night time.

Keywords: *The Air Pollution Model, air pollution, trajectory, emission rate.*

PENDAHULUAN

Kerusakan hutan yang terjadi selama ini di Indonesia umumnya diakibatkan karena kebakaran. Hutan yang terbakar mengakibatkan pencemaran udara, karena menghasilkan gas pencemar seperti CO₂ (karbon dioksida), CO (karbon monoksida), NO_x (nitrogen oksida), SO₂ (sulfur dioksida) serta pencemar berupa partikel seperti PM₁₀ dan PM_{2.5}. Produksi asap dan gas yang dihasilkan akibat kebakaran hutan akan terbawa angin dan penyebarannya akan menurunkan jarak pandang sehingga mengganggu aktifitas masyarakat. Produksi asap dan gas juga dapat memicu timbulnya berbagai macam gangguan kesehatan terutama gangguan pernapasan pada masyarakat yang terkena imbasnya secara langsung.

Kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan pada tahun 1997 merupakan salah satu kebakaran hutan terbesar dan berlangsung dalam periode yang panjang. Kondisi ini menyebabkan mutu kualitas udara di daerah Kalimantan pada saat terjadi kebakaran hutan menurun tajam (Glover, *et al.*, 1999) sehingga menimbulkan keresahan dari berbagai pihak terutama akibat asap tebal yang menyelimuti sebagian besar daratan Kalimantan bahkan hingga mencapai daratan Singapura dan Malaysia. Asap dan gas yang berasal dari kebakaran hutan di Kalimantan dan Sumatera juga dapat memicu timbulnya ketegangan antara Indonesia dengan negara-negara yang terkena imbas kabut asap seperti Malaysia, Singapura, dan Thailand. Kerugian yang ditimbulkan akibat kebakaran sangat besar, selain musnahnya sekitar 8 juta hektar areal hutan beserta semua potensi sumber daya alam hayati yang dikandungnya, kebakaran hutan juga telah menimbulkan dampak negatif pada lingkungan fisik, kesehatan, serta kehidupan sosial masyarakat yang terkena dampaknya (Glover, *et al.*, 1999).

Kebakaran hutan adalah jenis pembakaran yang tidak tertahan dan menyebar secara bebas dan mengkonsumsi bahan bakar yang terdiri dari serasah, rumput, cabang kayu yang sudah mati, patahan kayu, batang kayu, tunggak, daun-daunan dan pohon-pohonan yang masih hidup (Fuller, 1991).

Dasar dari proses terjadinya kebakaran adalah proses pembakaran secara kimia dan fisika. Energi yang tersimpan dalam biomassa dilepaskan pada saat bahan-bahan seperti daun, rumput, atau kayu berkombinasi dengan oksigen membentuk karbondioksida (CO_2), air, dan sejumlah substansi lain. Dalam kata lain, reaksi ini merupakan reaksi kebalikan dari fotosintesis, dimana CO_2 , air, dan energi matahari berkombinasi memproduksi suatu energi kimia simpanan dan oksigen (Saharjo, 2007).

Berdasarkan tipe penjalaran apinya kebakaran dapat dibagi menjadi beberapa tipe, yaitu :

- a. Kebakaran bawah (*ground fire*). Api berasal dari bahan organik yang terbakar di bawah serasah. Sifat kebakaran menjalar sangat pelan dan bergerak ke segala arah karena tidak terpengaruh oleh arah angin. Lahan bekas terbakar umumnya berbentuk lingkaran.
- b. Kebakaran permukaan (*surface fire*). Api berasal dari serasah, tanaman bawah dan semak yang terbakar. Api menjalar dengan cepat dan dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin, sehingga lahan bekas terbakar sering berbentuk lonjong.
- c. Kebakaran tajuk (*crown fire*). Api berasal dari kebakaran permukaan yang merambat ke tajuk. Api menjalar searah angin dan lahan bekas terbakar berbentuk memanjang.

Bahaya utama dari kebakaran maupun pembakaran hutan dan lahan adalah produksi asap disertai dengan pelepasan sejumlah *partikulat matter* (Debano *et al.*, 1998 dalam Saharjo, 2007). Dampak asap dan gas-gas yang dihasilkan dapat bervariasi, mulai dari yang bersifat lokal, yaitu menghalangi pemandangan, hingga kemungkinan pemanasan iklim global. Dampak ini sebagian besar merupakan hasil dari produk kimia utama dan emisi sekunder dari pembakaran.

Pencemaran udara yang diakibatkan oleh kebakaran hutan didominasi oleh asap dan partikulat. Asap kebakaran hutan terbentuk dari percampuran yang rumit antara gas dan partikulat-partikulat saat kayu dan material organik lainnya terbakar. Ancaman bahaya terbesar dari asap kebakaran hutan terletak pada kandungan partikulat-partikulatnya yang dapat memicu timbulnya kanker paru-paru dan jantung koroner, bahkan dapat mengakibatkan kematian prematur bagi para pengidapnya. Asap juga dapat menyebabkan iritasi mata, radang tenggorokan, batuk, sakit kepala, dan Infeksi Saluran Pernapasan Akut. Kebakaran hutan juga mengemisikan beberapa jenis gas yang berbahaya bagi kesehatan seperti CO_2 (karbon dioksida), CO (karbon monoksida), NO_x (nitrogen oksida), SO_2 (sulfur dioksida) serta pencemar berupa partikel seperti PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$. CO (karbon monoksida), NO_x (nitrogen oksida) dan *Particulate Matter* merupakan pencemar utama dan dapat membahayakan ekosistem serta lingkungan di sekitar kebakaran hutan.

Jumlah CO yang dilepaskan oleh api adalah fungsi efisiensi pembakaran, sehingga emisi CO akan meningkat jika pembakaran terjadi tidak efisien. Dampak CO terhadap kesehatan manusia sebagian besar bergantung pada lamanya penyebaran, konsentrasi CO dan tingkatan aktivitas fisik. Pemadam kebakaran yang terlibat langsung dalam kegiatan pemadaman atau pembangunan sekat bakar dekat lokasi pembakaran, harus berhati-hati terhadap dampak CO, yaitu pusing, lelah/lesu, dan kehilangan konsentrasi dan orientasi (Saharjo, 2003).

Kadar CO di atmosfer antara Belahan Bumi Utara dan Belahan Bumi Selatan berbeda karena perbedaan jumlah emisi CO. Daerah Belahan Bumi Utara yang memiliki lebih banyak daerah perkotaan menyebabkan kadar CO lebih tinggi sekitar 120 – 180 p.p.b. sedangkan di Belahan Bumi Selatan 60 – 70 p.p.b. Waktu tinggal gas CO secara global sekitar 2 bulan, sehingga dapat menyebabkan penumpukan gas CO di atmosfer (Hewitt, *et al.*, 2003).

Nitrogen oxide (NO_x) adalah suatu bentuk umum dari sekumpulan gas yang sangat reaktif, yang terdiri dari nitrogen dan oksigen dalam jumlah yang variatif. NO_x sebagian besar merupakan jenis gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, tetapi salah satu jenis polutan turunannya yaitu NO_2 yang terdispersi di udara dapat terlihat berwarna coklat kemerahan. NO_x terbentuk ketika bahan bakar di hutan seperti kayu kering dan serasah terbakar adalah suhu tinggi. NO_x dan Ozon di permukaan merupakan polutan yang bersifat toksik bagi kehidupan. NO_x dan SO_2 yang bereaksi dengan berbagai substansi

konsentrat dan air dapat menyebabkan terjadinya hujan asam. Siklus global nitrogen yang dinamis menyebabkan rata-rata waktu tinggal gas NO_x di udara relatif pendek. NO_x rata-rata berada di atmosfer hanya berkisar antara 1 hingga 4 hari. Waktu tinggal atmosfer yang relatif pendek ini menyebabkan efek terbesar NO_x terjadi dalam skala regional dan lokal (Seinfeld, 1986).

Particle pollution atau *Particulate matter* adalah suatu campuran partikel-partikel solid dan tetesan air yang dapat ditemukan di udara. Beberapa jenis partikel seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap cukup besar atau cukup gelap untuk dapat dilihat oleh mata, sedangkan sebagian besar lainnya sangat kecil hingga hanya dapat dideteksi melalui mikroskop elektron. Partikel-partikel ini dapat memiliki berbagai macam bentuk dan ukuran dan dapat terbentuk dari ratusan jenis zat kimia. Ukuran partikulat di atmosfer biasanya dibagi menjadi dua yaitu *fine particles* yang memiliki ukuran lebih kecil dari 2,5 mikrometer atau biasa disebut $\text{PM}_{2,5}$ dan *coarse particles* yang berukuran lebih besar dari 2,5 mikrometer dan lebih kecil dari 10 mikrometer atau biasa disebut PM_{10} (Hewitt, et al., 2003). *Primary particles* atau partikel-partikel utama merupakan partikel polutan yang diemisikan secara langsung dari sumber emisi, seperti situs-situs pembangunan, perbaikan jalan, ladang, dan kebakaran hutan. *Secondary particle* merupakan partikel yang terbentuk hasil reaksi kimiawi rumit yang mentransformasikan gas menjadi partikel yang terjadi di atmosfer seperti sulfur dioksida dan nitrogen oksida yang diemisikan oleh pembangkit energi, industri, dan kendaraan bermotor (Hewitt, et al., 2003).

Alam secara natural memiliki kemampuan untuk menetralsasi dan memperbaiki dan menjaga kondisi keseimbangan keberadaan suatu zat pencemar yang diemisikan ke alam. Proses pendistribusian asap kebakaran hutan atau gas-gas pencemar dipengaruhi oleh faktor meteorologi dan topografi.

Arah dan kecepatan angin memegang peranan penting dalam proses pengenceran (*dilution*) dan pemindahan (*transportation*). Proses penyebaran (*dispersion*) banyak dipengaruhi oleh variasi arah angin, jika arah angin secara kontinu menyebar ke berbagai arah maka area sebaran polutan semakin luas sedangkan apabila arah angin dominan tetap bergerak hanya ke satu arah tertentu maka daerah tersebut akan memiliki tingkat paparan polutan yang tinggi (Liptak et al., 2000).

Aliran udara yang bergerak dipengaruhi oleh kekasapan permukaan sehingga membentuk pergerakan tiga dimensional yang disebut turbulensi. Turbulensi eddy dihasilkan dari dua proses: (1) turbulensi termal yang dihasilkan dari pemanasan atmosfer, dan (2) turbulensi mekanik yang dihasilkan pergerakan udara yang melalui suatu permukaan yang kasap dalam aliran angin. Turbulensi membantu proses dispersi polutan dengan menyebarkan ke segala arah (Liptak et al., 2000).

Profil suhu udara lapisan troposfer memegang peranan penting dalam proses dispersi polutan. Profil suhu dari permukaan bumi hingga tropopause akan berbanding terbalik (*lapse rate*) terhadap ketinggian. Variasi suhu udara akan memicu terjadinya gradien tekanan di permukaan yang akan mengakibatkan variasi arah dan kecepatan angin. Variasi suhu udara juga dapat mempengaruhi stabilitas udara yang terbentuk, yang kemudian akan berperan dalam proses dispersi vertikal polutan.

Kelembaban udara sangat berpengaruh dalam proses terjadinya kebakaran hutan. Pada kondisi kelembaban udara rendah ranting-ranting mengering sehingga kebakaran semakin mudah terbentuk dan kebakaran hutan meluas lebih cepat (Fuller, 1991).

Radiasi matahari berperan penting dalam memanaskan permukaan bumi dan menentukan suhu permukaan bumi. Radiasi matahari yang tinggi akan meningkatkan suhu permukaan dan sebaliknya. Kenaikan suhu permukaan akan menyebabkan terjadinya distribusi tekanan udara sehingga memicu timbulnya angin. Angin yang berhembus pada musim kemarau dapat menimbulkan gesekan ranting-ranting kering yang merupakan salah satu bahan bakar terjadinya titik-titik api.

Presipitasi baik dalam bentuk hujan maupun salju memiliki kemampuan untuk membersihkan udara dari polutan dengan cara : (1) *washing out* atau membuang partikel-partikel besar bersamaan dengan jatuhnya molekul-molekul hujan atau butiran salju, (2) pengakumulasian partikel-partikel kecil dalam formasi butir hujan atau butir salju di awan, (3) proses pembuangan gas-gas polutan dengan cara pengenceran atau

absorpsi. Proses yang banyak terjadi dan sangat efektif adalah proses *wash out* partikel-partikel besar di lapisan bawah atmosfer dimana sebagian besar polutan diemisikan (Liptak *et al.*, 2000).

Stabilitas udara sangat dipengaruhi oleh perbedaan antara nilai *dry adiabatic lapse rate* dan *environmental lapse rate*. Kondisi udara tidak stabil terjadi apabila parcel udara bergerak naik atau turun dengan nilai penurunan suhu yang lebih rendah dibandingkan nilai *dry adiabatic lapse rate*, kondisi ini meningkatkan tingginya pergerakan vertikal parcel udara dan terjadinya turbulensi. Kondisi udara stabil terjadi apabila parcel udara bergerak naik dan memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan kondisi sekitarnya ataupun sebaliknya. Pada kondisi ini pergerakan vertikal udara tertahan oleh pendinginan atau pemanasan *adiabatic* (Liptak *et al.*, 2000).

Penentuan Stabilitas udara dengan menggunakan skala panjang Obukhov dibagi menjadi lima kriteria, yaitu sangat tidak stabil, tidak stabil, netral, stabil dan sangat stabil. Tabel 1 menunjukkan kriteria penentuan kestabilan atmosfer dengan skala panjang Obukhov.

Tabel 1. Kestabilan atmosfer skala panjang Obukhov (Seinfeld, 1986)

Panjang Obukhov (L dalam meter)	Kriteria Kestabilan	
Kecil Negatif	$-100 < L < 0$	Sangat Tidak Stabil
Besar Negatif	$-10^5 \leq L \leq -100$	Tidak Stabil
Sangat Besar (+ / -)	$ L > 10^5$	Netral
Besar Positif	$10 \leq L \leq 10^5$	Stabil
Kecil Positif	$0 < L < 10$	Sangat Stabil

Pada keadaan atmosfer stabil di mana massa udara akan mengalami pengangkatan sampai ketinggian tertentu dan akan turun kembali, maka hal ini akan sangat berbahaya karena akan menyebabkan asap terangkat, tetapi kemudian dapat turun kembali di daerah lain. Hal ini menjelaskan mengapa asap di Indonesia dapat mencapai negara tetangga atau yang biasa kita kenal dengan istilah *transboundary haze pollution*. Pada keadaan atmosfer netral di mana massa udara akan tetap (tidak mengalami pengangkatan dan tidak turun), maka asap yang timbul akan bertahan di daerah asalnya sehingga hal itu juga berbahaya bagi kesehatan dan dapat mengganggu aktivitas (Saharjo, 2003).

Stabilitas atmosfer menentukan batas ketinggian terjadinya pencampuran antara polutan dengan udara yang lebih bersih yang berada di atasnya. Jarak vertikal antara permukaan bumi dan suatu ketinggian maksimum dimana terjadinya pergerakan konveksional disebut *mixing height*. Secara umum, semakin tinggi *mixing height* maka kondisi kualitas udaranya semakin baik. Saat *mixing height* relatif rendah maka polutan hanya tercampur dengan massa udara bersih yang sedikit, sehingga konsentrasi polutan dapat menyentuh level berbahaya bagi kesehatan. Saat kondisi udara stabil, pergerakan konveksional tertekan dan *mixing height* menjadi rendah. Sebaliknya kondisi atmosfer tidak stabil menyebabkan udara bergerak naik dan *mixing height* yang lebih tinggi. Pemanasan permukaan bumi yang sebagian besar terjadi karena radiasi matahari membantu pergerakan konveksional, sehingga *mixing height* biasanya lebih tinggi pada siang dan sore hari (Lutgens *et al.*, 2004).

Topografi mempengaruhi kondisi meteorologi skala mikro dan meso di sekitar sumber emisi polutan. Pola aliran udara lokal memiliki efek signifikan dalam proses dispersi polutan. Pegunungan dan perbukitan juga dapat mempengaruhi aliran udara lokal seiring dengan peningkatan kekasaran permukaan dan memperlambat kecepatan angin. Pegunungan dan perbukitan merupakan penahan alamiah dalam pola pergerakan aliran udara (Liptak *et al.*, 2000).

Kebakaran hutan merupakan salah satu sumber emisi polutan berbentuk area atau wilayah. Penyebaran arah kebakaran hutan dipengaruhi oleh hembusan angin sehingga kebakaran yang awalnya berbentuk titik-titik api kemudian meluas menjadi kebakaran dalam suatu wilayah. Kondisi topografi pulau Kalimantan yang relatif rata dan tidak memiliki banyak gugusan pegunungan dan perbukitan menyebabkan kebakaran hutan meluas dengan sangat efektif.

Data-data dan penelitian terbaru menunjukkan bahwa 60% dari polusi asap di Indonesia, termasuk emisi karbon, berasal dari kebakaran di lahan-lahan gambut yang menutupi hanya 10-14% dari daratan Indonesia, terutama di pulau Kalimantan. (*Project FireFight Southeast Asia Publication*, 2003). Lahan-lahan gambut merupakan areal "penyimpan" karbon yang sangat penting. Mereka hanya menutupi sekitar 3% dari luas bumi, namun mengandung 20-35% dari semua karbon yang tersimpan di permukaan bumi. Lahan-lahan gambut tropik, seperti di Asia Tenggara, mempunyai kapasitas penyimpanan karbon yang sangat tinggi (3-6 kali lebih tinggi daripada lahan-lahan gambut di daerah beriklim sedang). Mereka juga sangat kaya akan keanekaragaman jenis hayati dengan banyak jenis yang unik dan hanya dijumpai di daerah rawa-rawa gambut (*Project FireFight Southeast Asia Publication*, 2003).

Kebakaran Hutan 1982-1983 dan 1987

Kebakaran hutan di Kalimantan Timur pada tahun 1982-1983 merupakan kebakaran hutan paling besar dalam sejarah. Kebakaran hutan yang menghancurkan 3,5 juta hektar hutan atau setara dengan 56 kali luas Singapura. Penyebabnya adalah perubahan struktur vegetasi akibat pembalakan kayu yang telah dimulai sekitar tahun 1970-an. Pembalakan menyisakan limbah kayu dalam jumlah besar yang menjadi bahan bakar. El Nino yang terjadi pada tahun 1982-1983 mengakibatkan terjadinya musim kemarau panjang sehingga memperparah kebakaran hutan. Asap yang ditimbulkan menyebabkan transportasi udara lumpuh di Kalimantan Timur, bahkan Surabaya. Asap juga mengganggu penerbangan dari dan ke Jakarta maupun dari dan ke Singapura serta melumpuhkan transportasi air di Balikpapan. Asap menimbulkan iritasi mata dan tenggorokan walaupun tidak ada catatan adanya korban jiwa. Masyarakat juga mengalami kerugian sosial ekonomi, diantaranya adalah berkurangnya cadangan makanan dan pasokan air bersih, terhambatnya akses ke desa terpencil, berkurangnya hasil hutan, dan dampak pada pendapatan tunai serta pekerjaan alternatif.

Kebakaran besar terjadi lagi pada tahun 1987 yang melanda hampir semua propinsi terutama bagian timur Kalimantan, Bali, Nusa Tenggara, Timor, serta Sulawesi dan Kalimantan Tengah. Indonesia kembali mengalami El Nino yang mengakibatkan terjadinya kemarau panjang sejak pertengahan bulan Juni 1987. Penyebab kebakaran hutan tahun 1987 disebabkan oleh kemarau panjang, perladangan berpindah yang dilakukan oleh masyarakat setempat, areal HPH yang tidak dikelola dengan baik, dan batu bara yang menyala terus menerus di Kalimantan Timur (KLH, 2001).

Kebakaran Hutan 1991 dan 1994

Kebakaran hutan terjadi lagi pada tahun 1991 dan dampaknya lebih luas hingga mencakup 23 propinsi dibandingkan kebakaran hutan pada tahun 1987. Pada tahun 1991 juga mulai muncul kesadaran bahwa kebakaran hutan juga menimbulkan kerugian di berbagai sektor non-kehutanan terutama perhubungan. Kerugian ini berkaitan dengan asap yang ditimbulkan oleh kebakaran hutan.

Maskapai Merpati Nusantara Airlines melaporkan 337 pembatalan penerbangan dari dan ke Sumatera dan Kalimantan dengan kerugian diperkirakan mencapai Rp 6,5 milyar. Tingkat hunian di berbagai hotel di Kalimantan dan Sumatera turun 20 hingga 70 persen karena bandara-bandara harus ditutup akibat kabut asap yang menurunkan jarak pandang atau visibilitas. Penyebaran asap ke negara tetangga di Asia Tenggara mulai dirasakan. Pemerintah Malaysia melaporkan kasus iritasi mata dan penyakit pernafasan meningkat. Singapura juga mengalami peningkatan penyakit pernafasan dan iritasi mata pada bulan September 1991 dan jarak pandang hanya satu kilometer (Skpehi, 1992 dalam KLH, 2001).

Kebakaran Hutan 1997

Kebakaran hutan dan lahan tahun 1997 meliputi 25 propinsi di Indonesia, hanya di Jakarta dan Timtim yang tidak melaporkan adanya kebakaran hutan. Propinsi yang kondisinya paling buruk adalah Kalimantan Selatan, Kalimantan Tengah, Kalimantan Barat, Sumatera Selatan dan Jambi. Pada akhir September 1997, dapat diidentifikasi sebanyak 167 titik api. Pada bulan Oktober 1997 api telah mebakar sedikitya 627.280 ha lahan. Sebesar 72 persen dari areal yang terbakar berlokasi di Kalimantan, termasuk 260.000 lahan gambut di Kalimantan Tengah (KLH, 2001).

Beberapa hal menjadi catatan penting dari kebakaran hutan yang terjadi pada tahun 1997. *Pertama* pemerintah mulai menyadari sebagian besar api disebabkan oleh pembukaan lahan skala besar untuk perkebunan, HTI (Hutan Tanaman Industri), dan transmigrasi. *Kedua*, dampak asap pada kesehatan mulai dikhawatirkan terutama merebaknya penyakit ISPA (Infeksi Saluran Pernafasan Akut) akibat kabut asap. *Ketiga*, asap yang meluas ke negara tetangga seperti Singapura dan Malaysia juga lebih serius dibandingkan tahun-tahun sebelumnya. *Keempat*, untuk pertama kalinya kebakaran hutan dan lahan dinyatakan sebagai bencana nasional. *Kelima*, informasi mengenai luas lahan yang terbakar, bandara yang tertutup, kualitas udara, dampak ekonomi dan ekologi lainnya cukup terbuka dibicarakan.

Polusi udara di suatu area dipengaruhi oleh kondisi sumber polutan serta dipengaruhi juga oleh proses transportasi maupun transformasi (reaksi kimiawi) polutan di atmosfer. Proses transportasi maupun transformasi polutan sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi suhu udara, arah dan kecepatan angin, kelembaban udara, dan curah hujan serta *mixing height*.

Seberapa besar suatu sumber emisi polutan mempengaruhi kualitas udara ambien dapat diduga menggunakan model, salah satunya adalah TAPM adalah model simulasi dua dan tiga dimensi untuk bidang pencemaran udara, TAPM juga mampu memprediksikan seluruh parameter meteorologi yang dibutuhkan untuk kajian studi lebih lanjut tanpa membutuhkan data-data lokal. TAPM juga dilengkapi GUI (*Graphical User Interface*) dan GIS (*Graphical Information System*) yang mampu menghasilkan animasi dari hasil simulasi. Software TAPM merupakan pengembangan dari LADM (Lagrangian Atmospheric Dispersion Model) yang keduanya dikembangkan oleh CSIRO, Australia. Besarnya konsentrasi polutan dan parameter meteorologi dapat dilihat pada tiap grid dan level ketinggian.

Model pencemaran udara yang menggunakan data prediksi meteorologi dan turbulensi, memiliki empat bagian penyusun yaitu :

1. EGM (*Eulerian Grid Module*) untuk memecahkan persamaan rata-rata dan variasi konsentrasi, dan untuk korelasi silang antara konsentrasi dan suhu potensial.
2. LPM (*Lagrangian Particle Module*) dapat digunakan untuk merepresentasikan dispersi di dekat sumber pencemar dengan lebih akurat.
3. *Plume Rise Module* digunakan untuk menentukan momentum dari cerobong asap dan efek buoyancy pada sumber titik.
4. *Building Wake Module* memudahkan perhitungan penyebaran dan dispersi polutan dengan mempertimbangkan aspek meteorologi dan turbulensi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memetakan arah penyebaran (trayektori) sebaran polutan akibat kebakaran hutan Kalimantan, menganalisa pengaruh stabilitas atmosfer dan *mixing height* terhadap konsentrasi polutan akibat kebakaran hutan dan menganalisa pengaruh arah dan kecepatan angin terhadap pergerakan arah penyebaran (trayektori) polutan akibat kebakaran hutan di Kalimantan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain, seperangkat *Personal Computer* (PC) didukung dengan *software* TAPM_GUI *ver.* 3.7 dan *Graphical Information System* (GIS) *ver.* 3.0 dari CSIRO-Australia, Arc View 3.3 dan Microsoft Office 2003. *Software-software* program digunakan dalam analisa pemodelan meteorologi dan polutan, serta penentuan arah trayektorinya.

Data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Data *Input* Utama TAPM, Data *input* utama TAPM adalah data yang tersimpan dalam *database* utama TAPM dengan file berekstensi *.sas dengan penamaan file tersebut merujuk pada tanggal perekaman data.
- b. Data Lokasi *Hotspot* Tahun 2006 dari Departemen Kehutanan RI.
- c. Data Emisi Kebakaran Hutan, Data emisi kebakaran hutan merupakan hasil estimasi yang terdiri dari data emisi CO, NO_x, dan PM_{2,5} merupakan hasil analisa citra satelit MODIS dan dengan pendekatan model *biogeochemical Carnegie-Ames-Stanford-*

Approach (CASA). Data emisi kebakaran hutan ini didapatkan dari *Global Fire Emissions Database version 2*.

- d. Data *Basemap* Kalimantan, Data *basemap* pulau Kalimantan digunakan untuk proses *plotting data input* dan hasil *output* model.

Perhitungan dan Konversi Data

Data-data yang telah didapatkan dari berbagai sumber kemudian diolah, dengan alur proses sebagai berikut :

- Data Area Kebakaran Hutan yang berupa titik-titik *hotspot* yang dikonversi menjadi point, area dan line.
- Perhitungan Laju Emisi Kebakaran Hutan, Laju emisi kebakaran hutan yang digunakan dalam penelitian ini adalah laju emisi kebakaran hutan untuk unsur CO, NO_x, dan partikulat (PM_{2,5}).

Running Model TAPM

- Menentukan waktu simulasi model. Waktu simulasi model ditentukan berdasarkan musim yang dialami wilayah Kalimantan, yaitu:
 - Musim Transisi 1 (Hujan - Kemarau) yang diwakili tanggal 10 - 16 Mei 2006
 - Musim Kemarau yang diwakili tanggal 14 - 20 Juli 2006
 - Musim Transisi 2 (Kemarau - Hujan) yang diwakili tanggal 18 - 24 September 2006
 - Musim Hujan yang diwakili tanggal 6 - 12 Desember 2006.
- Menentukan *nesting* grid dan penentuan wilayah atau domain luas kajian simulasi.
- Input data data analisa sinoptik dengan interval waktu 6 jam setiap 75 s/d 100 km persegi yang termasuk dalam suatu kumpulan *database* harian dengan file berekstensi *.sas.
- Menentukan ukuran luas domain yang merupakan data *input* dengan ukuran 1.087,5 × 1.087,5 km.
- Memasukkan data input laju emisi polutan berupa data jenis dan sumber polutan, nilai laju emisi, dan lokasi kebakaran hutan. Pemilihan jenis polutan yang digunakan yaitu menggunakan *dust mode* dengan tiga pilihan gas *tracer* utama yaitu TR1, TR2, dan TR3. TR1 untuk laju emisi partikulat (PM_{2,5}), TR2 untuk laju emisi NO_x, dan TR3 digunakan untuk laju emisi CO. Sumber polutan yang digunakan adalah untuk *Area Source File*, karena data *input* untuk kebakaran hutan merupakan data area. Sumber polutan dan nilai ketinggian sumber emisi polutan, dalam penelitian ini ketinggian sumber emisi polutan diasumsikan 5 meter, karena hutan hujan tropis Kalimantan didominasi oleh tumbuhan *family* Dipterocarp yang rata-rata ketinggiannya sekitar 5 meter. Nilai laju emisi polutan yang digunakan berdasarkan data GFEDv2 dengan interval 8 hari yang telah dikonversi untuk mendapatkan laju emisi per detik, karena proses simulasi model hanya 7 hari maka diasumsikan nilai laju emisinya konstan untuk satu waktu simulasi dan satu daerah tertentu.
- Analisa terhadap hasil simulasi TAPM. Hasil simulasi TAPM berbentuk tabel untuk *output* unsur-unsur meteorologi dan konsentrasi polutan serta berbentuk visualisasi gambar untuk melihat trayektori.
- Menghitung nilai rata-rata angin didapatkan dari komponen horizontal *u* dan *v* (m/s) dari persamaan momentum dan mengikuti kecepatan vertikal topografi tanah σ (m/s) dari persamaan kontinuitas, dapat dilihat pada persamaan 3.2 hingga 3.3.
- Proses simulasi TAPM menggunakan *The Eulerian Grid Module* untuk menentukan konsentrasi polutan, suhu potensial, dan kelembaban udara, serta termasuk adveksi, difusi, dan perhitungan emisi polutan S_x dan reaksi kimiawi R_x (Hurley, 2005).
- Simulasi TAPM menggunakan *Lagrangian Particle Module* (LPM) untuk dapat menentukan dispersi polutan di daerah sekitar sumber emisi. LPM juga dapat digunakan untuk menghitung perubahan total konsentrasi polutan yang telah bergerak dari sumber emisi (Hurley, 2005).
- Data konsentrasi kebakaran hutan hasil *output* TAPM dikorelasikan secara sederhana dengan komponen meteorologis hasil *output* TAPM, yaitu suhu udara, kelembaban udara, kecepatan angin, radiasi matahari total, intensitas hujan, *mixing height*, dan stabilitas atmosfer menggunakan Microsoft Excel.

Asumsi

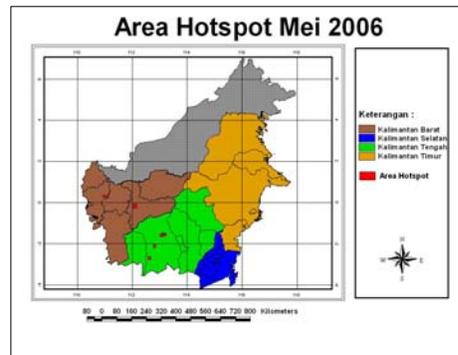
Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Area kebakaran hutan yang telah dikelompokkan akan berbentuk kotak karena hanya memasukkan dua titik terjauh dalam suatu wilayah.
2. Ketinggian yang diemisikan kebakaran hutan Kalimantan setinggi 5 meter.
3. Laju emisi kebakaran hutan konstan untuk satu selang waktu dan satu daerah tertentu.
4. Pengeluaran emisi kebakaran hutan dimulai tepat pada pukul 00.00 pada hari pertama simulasi.
5. Curah hujan di daerah Kalimantan dianggap seragam

HASIL DAN PEMBAHASAN

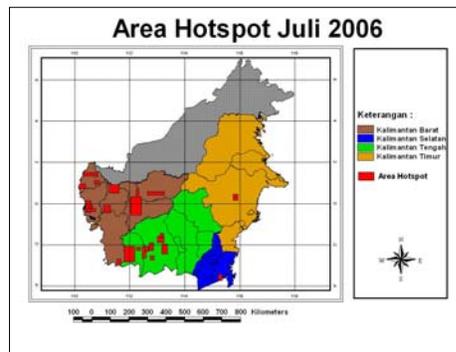
Area Kebakaran Hutan

Kebakaran hutan pada musim transisi antara musim hujan dan musim kemarau di bulan Mei 2006 terdeteksi ada tujuh area kebakaran hutan yang cukup luas, dua area di propinsi Kalimantan Barat dan lima area di propinsi Kalimantan Tengah. Curah hujan yang masih relatif tinggi menyebabkan masih sedikitnya titik-titik api yang meluas dan membentuk area kebakaran hutan. Data lokasi *hotspot* 10 – 16 Mei 2006.



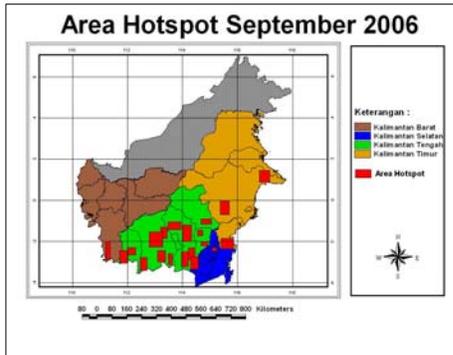
Gambar 1. Area Kebakaran Hutan Musim Transisi 1 (Mei 2006)

Bulan Juli merupakan masa-masa terkering dan terpanas dalam satu periode satu tahun di pulau Kalimantan sehingga jumlah area kebakaran hutan semakin banyak, luas area kebakarannya semakin luas, dan emisi yang dikeluarkan pun semakin pekat. Bulan Juli 2006 terdeteksi 24 areal luas kebakaran hutan, dengan yang terbanyak di wilayah propinsi Kalimantan Barat sebanyak 13 area, sedangkan di Kalimantan Tengah terdapat 9 area kebakaran hutan, dan di Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan masing-masing terdapat satu area kebakaran. Data lokasi *hotspot* 14 – 20 Juli 2006.

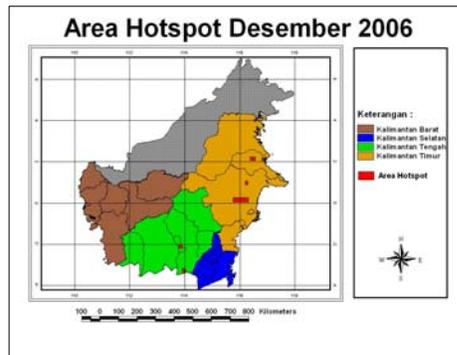


Gambar 2. Area Kebakaran Hutan Musim Kemarau (Juli 2006)

Titik-titik *hotspot* dan area kebakaran hutan yang terbentuk pada musim transisi antara musim kering dan musim hujan seperti di bulan September tidak seluas dan sebanyak bulan Juli. Area kebakaran hutan yang terdeteksi sebanyak 20 area, dengan didominasi di propinsi Kalimantan Tengah dengan 14, kemudian diikuti 3 area kebakaran hutan di Kalimantan Timur, 2 area di Kalimantan Selatan dan satu area di Kalimantan Barat. Data lokasi *hotspot* 18 – 24 September 2006.

**Gambar 3.** Area Kebakaran Hutan Musim Transisi 2 (September 2006)

Bulan Desember termasuk dalam musim hujan dimana curah hujan melimpah dan menjadi penahan terhadap kebakaran. Hujan juga bekerja sebagai pembersih udara dengan proses pencucian yang mencuci partikulat seperti $PM_{2.5}$ hasil emisi kebakaran hutan dan proses pengenceran gas-gas pencemar udara seperti NO_x dan CO sehingga kualitas udara di bulan-bulan musim hujan cenderung lebih baik dibandingkan di musim kemarau dimana proses pencucian dan pengenceran yang dilakukan oleh hujan tidak terjadi. Kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Desember 2006 hanya terjadi pada 6 area kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan Tengah dan Kalimantan Timur. Data lokasi *hotspot* 6 – 12 Desember 2006.

**Gambar 4.** Area Kebakaran Hutan Musim Basah (Desember 2006)

Laju Emisi

▪ $PM_{2.5}$

Laju emisi $PM_{2.5}$ pada bulan Mei 2006 tercatat relatif rendah karena adanya proses *wash out* atau terbawanya partikel-partikel $PM_{2.5}$ oleh butir-butir hujan. Laju emisi $PM_{2.5}$ tertinggi terdeteksi di wilayah Danau Sembuluh, Kalimantan Tengah sebesar $8,68 \text{ g s}^{-1}$. Laju emisi $PM_{2.5}$ pada bulan Juli tertinggi terjadi di daerah sekitar Kubu, Kalimantan Barat sebesar $87,52 \text{ g s}^{-1}$. Bulan September 2006 merupakan salah satu musim kebakaran hutan yang relatif besar. Laju emisi $PM_{2.5}$ yang dihasilkan dari kebakaran hutan pada bulan September 2006 tertinggi terjadi di Kotawaringin Barat, Kalimantan Tengah sebesar $2164,47 \text{ g s}^{-1}$. Bulan Desember 2006 laju emisi $PM_{2.5}$ yang terjadi akibat kebakaran hutan semakin rendah, sejalan dengan semakin kecilnya luas dan jumlah area kebakaran hutan. Laju emisi $PM_{2.5}$ yang tertinggi tercatat terjadi di wilayah

Kutai, Kalimantan Timur sebesar $28,29 \text{ g s}^{-1}$. Emisi $\text{PM}_{2,5}$ akibat kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Mei, Juli, September, dan Desember 2006.

- NO_x

Laju emisi NO_x pada bulan Mei 2006 tercatat rendah karena adanya proses *dilution* atau pengenceran oleh butir-butir hujan. Laju emisi NO_x tertinggi terdeteksi di wilayah Danau Sembuluh, Kalimantan Tengah sebesar $0,17 \text{ g s}^{-1}$. Laju emisi NO_x pada bulan Juli tertinggi terjadi di daerah sekitar Bulik, Kalimantan Tengah sebesar $155,7 \text{ g s}^{-1}$. Bulan September 2006 laju emisi NO_x pada bulan ini sangat tinggi, laju emisi NO_x yang dihasilkan dari kebakaran hutan pada bulan September 2006 terjadi di Sukamara, Kalimantan Tengah sebesar $577,41 \text{ g s}^{-1}$. Bulan Desember 2006 laju emisi NO_x yang terjadi akibat kebakaran hutan juga semakin rendah, laju emisi NO_x yang tertinggi tercatat terjadi di wilayah Kutai, Kalimantan Timur sebesar $4,74 \text{ g s}^{-1}$. Emisi NO_x akibat kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Mei, Juli, September, dan Desember 2006.

- CO

Emisi CO yang dihasilkan akibat kebakaran hutan merupakan salah satu penyumbang CO yang terbesar ketiga, setelah sektor transportasi dan industri. Gas CO terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna dari bahan bakar lembab yang terbakar ketika terjadi kebakaran hutan. Karakteristik hutan hujan tropis di Indonesia yang lembab dan termasuk daerah yang curah hujannya relatif tinggi menyebabkan gas CO mudah terbentuk ketika terjadi kebakaran hutan. Gas CO juga mudah terbentuk karena tanah di pulau Kalimantan didominasi tanah gambut hasil dari rawa-rawa yang mengering, terbuka, dan kekurangan air. Tanah gambut memiliki karakteristik dan tipe tanah yang dapat menyimpan unsur karbon, sehingga apabila terbakar dapat melepaskan karbon yang dikandungnya.

Laju emisi tertinggi pada bulan Mei 2006 terjadi di wilayah Danau Sembuluh, Kalimantan Tengah sebesar $9,71 \text{ g s}^{-1}$. Laju emisi CO pada bulan Juli tertinggi terjadi di daerah sekitar Cempaga, Kalimantan Tengah sebesar $6304,53 \text{ g s}^{-1}$. Bulan September 2006 laju emisi CO pada bulan ini sangat tinggi, laju emisi CO yang dihasilkan dari kebakaran hutan pada bulan September 2006 terjadi di Sukamara, Kalimantan Tengah sebesar $5216,62 \text{ g s}^{-1}$. Bulan Desember 2006 laju emisi CO yang terjadi akibat kebakaran hutan juga semakin rendah meskipun tetap lebih tinggi dibandingkan laju emisi NO_x dan $\text{PM}_{2,5}$. Laju emisi CO yang tertinggi tercatat terjadi di wilayah Kutai, Kalimantan Timur sebesar $256,94 \text{ g s}^{-1}$. Emisi CO akibat kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Mei, Juli, September, dan Desember 2006.

Mixing Height

Lapisan pencampuran atau *mixing height* merupakan suatu batas ketinggian dimana terjadinya pencampuran antara polutan dengan udara yang lebih bersih di atasnya. *Mixing height* dipengaruhi oleh kondisi stabilitas atmosfer. Pada kondisi *mixing height* yang tinggi polutan mengalami pencampuran dengan daerah yang lebih luas daripada *mixing height* yang rendah. Oleh karena itu, kondisi *mixing height* yang tinggi mampu mengencerkan pencemar dengan lebih luas, sehingga kondisi ini lebih menguntungkan dalam pengendalian dampak pencemaran udara (Sumaryati, 2007).

Lapisan udara di atas *mixing height* tidak lagi berpengaruh terhadap dispersi pencemaran udara di permukaan bumi. Pencemar yang berasal dari permukaan bumi akan terdispersi pada lapisan udara di bawah *mixing height*. Namun ada pencemar dari permukaan bumi yang mampu menembus *mixing height* jika mempunyai energi kinetik yang sangat tinggi, seperti debu vulkanik akibat letusan gunung berapi yang akhirnya menjadi aerosol di lapisan stratosfer (Sumaryati, 2007).

Kondisi *mixing height* yang lebih besar secara umum terjadi pada siang hari bahkan dapat mencapai ketinggian lebih dari 1000 m, dimana radiasi matahari menyebabkan terjadinya pemanasan parsel udara hingga suhunya lebih tinggi dibandingkan dengan suhu udara sekitarnya. Naiknya parsel udara tersebut akan menyebabkan naiknya ketinggian lapisan udara yang mengalami pencampuran dengan polutan.

Kondisi pada malam hari berkebalikan dengan kondisi siang hari dimana rata-rata ketinggian *mixing height* 40 hingga 80 meter, hal ini disebabkan oleh ketiadaan pemanasan parsel udara oleh radiasi matahari. Pada malam hari kenaikan parsel udara

tertahan oleh adanya lapisan inversi dimana suhu parcel udara lebih dingin dibandingkan dengan suhu lingkungan di lapisan inversi, sehingga parcel udara tersebut akan kemabali pada ketinggian semula karena massa jenisnya lebih besar dibandingkan dengan kondisi sekitarnya.

Kondisi *mixing height* secara umum pada kondisi atmosfer tidak stabil maka ketinggian lapisan pencampuran akan semakin tinggi. Sebaliknya pada kondisi atmosfer stabil di malam hari ketinggian lapisan pencampuran akan rendah karena tertahan oleh lapisan inversi.

Profil *mixing height* secara umum juga dipengaruhi oleh suhu udara dan kelembaban udara. Pada kondisi suhu udara relatif tinggi dan kelembaban udara rendah maka *mixing height* akan semakin tinggi karena perbedaan temperatur dan massa jenis antara parcel udara dengan lingkungan sekitarnya akan semakin tinggi. Sedangkan apabila pada kondisi kelembaban udara tinggi dan suhu udaranya relatif rendah maka *mixing height* akan semakin rendah karena gradien suhu udara dengan massa jenisnya tidak terlalu besar. Hal ini menyebabkan pada siang hari *mixing height* lebih tinggi dibandingkan pada malam hari dan *mixing height* pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan dengan musim hujan.

Analisa Output TAPM untuk Konsentrasi Polutan

Konsentrasi rata-rata $PM_{2,5}$, NO_x , dan CO yang diemisikan oleh kebakaran hutan di pulau Kalimantan yang terjadi pada bulan Mei, Juli, September, dan Desember tahun 2006. Secara umum konsentrasi polutan maksimum terjadi pada malam hari. Hal ini disebabkan karena kondisi atmosfer yang sangat stabil sehingga tidak efektifnya pencampuran udara karena turbulensi yang menjadi pemicu pencampuran udara bersih dengan polutan tidak terjadi. Kondisi malam hari dimana *mixing height* yang rendah juga menyebabkan ketersediaan udara bersih yang mengalami akan pencampuran dengan polutan sedikit sehingga konsentrasi polutan di udara melonjak tajam.

▪ *Konsentrasi $PM_{2,5}$*

Emisi $PM_{2,5}$ pada kebakaran hutan berasal dari pembakaran biomassa tumbuhan. Sehingga kadar $PM_{2,5}$ yang diemisikan di udara sangat bergantung pada luas area kebakaran hutan dan laju emisi kebakaran hutan. Semakin luas area kebakaran hutan maka semakin banyak pula biomassa tumbuhan yang terbakar dan pelepasan $PM_{2,5}$ ke atmosfer pun semakin banyak, begitu pun sebaliknya.

Konsentrasi polutan cukup tinggi terjadi pada bulan September 2006 dimana rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ $81,18 \mu g m^{-3}$. Titik tertinggi konsentrasi polutan akibat kebakaran hutan yang terjadi pada bulan September 2006 terjadi pada malam hari di hari ke lima simulasi. Konsentrasi maksimum $PM_{2,5}$ tercatat mencapai $305 \mu g m^{-3}$. Konsentrasi polutan pada siang hari kondisinya lebih rendah dibandingkan pada malam hari. Titik terendah konsentrasi $PM_{2,5}$ pada pukul 12 siang di hari ke tujuh simulasi model TAPM.

Konsentrasi tertinggi setelah bulan September terjadi pada bulan Juli dimana rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ pada bulan Juli tercatat $10,46 \mu g m^{-3}$. Konsentrasi maksimum pada bulan Juli juga terjadi pada malam hari pada hari ke enam simulasi pukul 03.00 dinihari, dimana konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara tercatat $32,95 \mu g m^{-3}$. Sedangkan konsentrasi minimum $PM_{2,5}$ pada bulan Juli juga terjadi pada siang hari pukul 12.00, dimana konsentrasi $PM_{2,5}$ hanya berkisar $0,72 \mu g m^{-3}$.

Konsentrasi $PM_{2,5}$ pada bulan Mei dan bulan Desember relatif kecil. Kecilnya area kebakaran hutan yang menyebabkan sedikitnya biomassa tumbuhan yang terbakar menyebabkan pelepasan $PM_{2,5}$ ke udara relatif sedikit. Pada bulan Mei, konsentrasi rata-rata $PM_{2,5}$ hanya sekitar $2,36 \mu g m^{-3}$. Pada bulan Desember konsentrasi $PM_{2,5}$ rata-rata lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi rata-rata pada bulan Mei, yaitu sekitar $4,39 \mu g m^{-3}$.

Pencemaran partikel terutama $PM_{2,5}$ merupakan penyebab terjadinya kabut asap yang dapat menurunkan jarak pandang. Kabut asap yang terjadi pada kebakaran hutan tahun 2006 menyebabkan beberapa sekolah terpaksa meliburkan siswanya, mengganggu jadwal penerbangan, serta mengganggu transportasi laut di sekitar pulau Kalimantan.

Kota-kota seperti Pontianak di Kalimantan Barat dan Palangka Raya di Kalimantan Tengah menerima dampak yang sangat besar.

▪ *Konsentrasi NO_x*

Laju emisi NO_x akibat kebakaran hutan tidak sebesar laju emisi PM_{2,5} dan laju emisi CO, namun gas NO_x sangat berbahaya bagi kehidupan manusia, hewan, maupun tumbuhan. Menurut Seinfeld (1986) distribusi gas NO_x di udara sangat tidak seragam. Ketidakterseragaman ini disebabkan akibat mudahnya gas NO_x bereaksi dengan gas lainnya di udara. Emisi NO_x terbesar berasal dari produksi bakteri-bakteri alamiah yang banyak terdapat di hutan.

Proses di atmosfer menyebabkan gas NO_x dapat bereaksi dengan berbagai gas sehingga dapat kandungannya berubah-ubah. NO dapat bereaksi dan memecah ozon hingga menghasilkan gas NO₂ dan O₂. Waktu tinggal NO ataupun NO₂ sangat pendek hanya berkisar beberapa jam. Hal ini menyebabkan konsentrasi NO_x di udara relatif kecil. Proses perubahan NO_x menjadi HNO₃ juga menyebabkan kadar NO_x semakin kecil, karena HNO₃ mudah terdeposisi secara langsung atau mengalami proses deposisi kering (Seinfeld, 1986).

Konsentrasi NO_x pada kebakaran hutan di Kalimantan tahun 2006 hanya bergerak di kisaran puluhan $\mu\text{g m}^{-3}$. Konsentrasi NO_x tertinggi sama seperti konsentrasi PM_{2,5} terjadi pada bulan September 2006. Faktor luasan dan laju emisi polutan pada bulan September yang lebih besar dibandingkan pada bulan-bulan lainnya juga menjelaskan mengapa nilai konsentrasi maksimum terjadi pada bulan September 2006.

Konsentrasi NO_x rata-rata pada bulan September tercatat sebesar $17,06 \mu\text{g m}^{-3}$. Fluktuasi konsentrasi NO_x menyerupai PM_{2,5}. Titik konsentrasi tertinggi terjadi pada hari ke lima simulasi pada bulan September sebesar $51,30 \mu\text{g m}^{-3}$ yang terjadi pada pukul 02.00 dinihari. Sedangkan konsentrasi terendah NO_x terjadi pada pukul 11 siang di hari pertama simulasi.

Konsentrasi tertinggi setelah bulan September terjadi pada bulan Juli dimana rata-rata konsentrasi NO_x pada bulan Juli tercatat $5,19 \mu\text{g m}^{-3}$. Konsentrasi maksimum pada bulan Juli terjadi pada pagi hari pukul 06.00 pada hari ke lima simulasi, dimana konsentrasi NO_x di udara tercatat $17,04 \mu\text{g m}^{-3}$. Sedangkan konsentrasi minimum NO_x pada bulan Juli terjadi pada sore hari pukul 16.00, dimana konsentrasi NO_x tercatat hanya $0,54 \mu\text{g m}^{-3}$.

Konsentrasi NO_x pada bulan Mei dan bulan Desember relatif kecil. Faktor kecilnya area kebakaran hutan juga menyebabkan pelepasan NO_x ke udara relatif sedikit. Pada bulan Mei, konsentrasi rata-rata NO_x hanya sekitar $0,06 \mu\text{g m}^{-3}$. Pada bulan Desember konsentrasi NO_x rata-rata sedikit lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi rata-rata pada bulan Mei, yaitu sekitar $0,82 \mu\text{g m}^{-3}$. Rendahnya konsentrasi NO_x pada bulan Mei dan September menyebabkan efek polutan NO_x hanya berada dalam skala lokal.

▪ *Konsentrasi CO*

Laju emisi CO hasil kebakaran hutan di pulau Kalimantan lebih tinggi dibandingkan laju emisi PM_{2,5} dan NO_x. Tingginya laju pelepasan CO ke atmosfer sebagian besar diakibatkan pembakaran biomassa tumbuhan yang tidak sempurna ditambah dengan pelepasan CO oleh lahan gambut yang terbakar. Menurut *Project FireFight Southeast Asia Publication* (2002) kebakaran hutan di lahan bekas rawa-rawa gambut mengemisikan sekitar 13 hingga 40 % emisi karbon ke atmosfer termasuk gas CO.

Konfigurasi profil emisi rata-rata gas CO berbeda dengan profil emisi rata-rata gas NO_x dan partikulat PM_{2,5}. Profil gas CO menunjukkan bahwa puncak kebakaran hutan yang mengemisikan CO terbesar terjadi pada bulan Juli dan September. Input laju emisi mempengaruhi hal ini, pada bulan Juli rata-rata CO pada bulan Juli sebesar $1070,98 \text{ g s}^{-1}$, sedangkan pada bulan September $2051,64 \text{ g s}^{-1}$.

Konsentrasi rata-rata CO pada bulan Juli sebesar $159,77 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan konsentrasi rata-rata pada bulan September sekitar $144,65 \mu\text{g m}^{-3}$. Konsentrasi maksimum antara bulan Juli dan September, sama terjadi pada hari ke enam simulasi. Konsentrasi maksimum pada bulan Juli terjadi pada pukul 06.00 pagi sebesar $469,64 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan konsentrasi maksimum pada bulan September terjadi pada pukul 02.00

dinihari. Konsentrasi minimum pada bulan Juli terjadi pada hari ke empat pukul 15.00 sebesar $24,59 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan pada bulan September terjadi pada hari ke tujuh simulasi pukul 11.00 siang sebesar $27,42 \mu\text{g m}^{-3}$.

Konsentrasi rata-rata pada bulan Mei dan Desember lebih rendah dibandingkan konsentrasi pada bulan Juli dan September. Konsentrasi rata-rata CO pada bulan Mei sebesar $1,58 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan konsentrasi rata-rata pada bulan Desember sekitar $13,49 \mu\text{g m}^{-3}$. Konsentrasi maksimum bulan Mei terjadi pukul 07.00 pada hari ke lima sebesar $4,33 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan konsentrasi maksimum pada bulan Desember terjadi pukul 06.00 pada hari pertama simulasi sebesar $31,1 \mu\text{g m}^{-3}$. Konsentrasi minimum pada bulan Mei terjadi pada hari ke tujuh pukul 15.00 sebesar $0,19 \mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan pada bulan Desember terjadi pada hari ke enam simulasi pukul 15.00 sebesar $1,34 \mu\text{g m}^{-3}$.

Pola Dispersi dan Trayektori Polutan Hasil Output TAPM

Polutan dalam bentuk gas dan partikel yang diemisikan ke atmosfer mengalami proses dispersi oleh pergerakan udara yang membawanya dari sumber polutan serta mengalami proses pengenceran ke dalam massa parcel udara yang lebih luas oleh urbulensi eddy. Proses *dispersion* dan *dilution* ini dipengaruhi oleh perbedaan kerapatan antara polutan dan atmosfer, oleh proses deposisi, dan juga dipengaruhi oleh berbagai efek rumit, termasuk efek topografi (Hewitt, 2003).

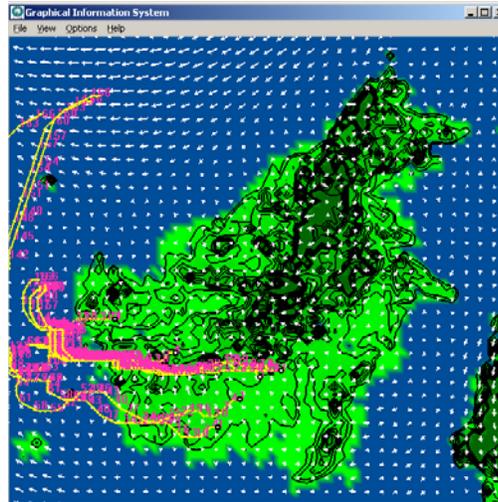
▪ *Musim Transisi 1*

Musim transisi 1 merupakan musim transisi antara musim hujan dan musim kemarau, dalam penelitian ini diwakili oleh bulan Mei. *Running* TAPM bulan Mei untuk tanggal 10 – 16 Mei 2006 dengan area kebakaran hutan yang terdeteksi sebanyak 7 area. Hasil visualisasi untuk bulan Mei 2006, yang ditampilkan dalam satu hari sementara untuk penggambaran yang lebih terperinci sepanjang waktu simulasi.

Penyebaran unsur-unsur polutan $\text{PM}_{2,5}$, NO_x , dan CO pada bulan Mei namun tidak terlihat apapun selain arah angin dan pulau Kalimantan. Hal ini diakibatkan nilai *input* laju emisi yang kecil pada bulan Mei sehingga menghasilkan nilai konsentrasi polutan yang relatif kecil bila dibandingkan kondisi di bulan lainnya. Luasnya wilayah domain juga menyebabkan visualisasi gambar konsentrasi polutan tidak terlihat.

Konsentrasi polutan pada bulan Mei 2006 relatif kecil pada musim transisi antara musim hujan dan musim kemarau, hal ini menunjukkan proses *wash out* $\text{PM}_{2,5}$ dan proses *dilution* NO_x dan CO masih terjadi secara efektif. Proses pengenceran oleh curah hujan memiliki dampak lebih kuat dibandingkan proses *wash out* karena nilai konsentrasi CO dan NO_x lebih kecil dibandingkan nilai konsentrasi partikulat $\text{PM}_{2,5}$ yang mengalami proses *wash out*. Proses *wash out* tidak berjalan secara efektif karena $\text{PM}_{2,5}$ merupakan tipe partikulat terkecil dengan rata-rata diameternya lebih kecil daripada 2,5 mikrometer, sehingga lebih sulit tertangkap oleh butir hujan yang jatuh ke permukaan Bumi. Bulan Mei bukan merupakan bulan yang termasuk ke dalam musim kebakaran hutan. Intensitas hujan yang terjadi di bulan ini meskipun tidak terlalu besar namun sudah cukup untuk meredam pembentukan titik-titik api. Kelembaban udara di bulan Mei relatif tinggi hampir di seluruh pulau Kalimantan kecuali untuk sebagian kecil di wilayah Kalimantan Barat dan Kalimantan Timur. Tingginya kelembaban udara menyebabkan udara cenderung lembab sehingga dapat mengurangi terjadinya kebakaran hutan.

Kondisi trayektori asap kebakaran hutan sangat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin. Pola *windrose* di Kalimantan Barat menunjukkan angin bergerak dominan bergerak ke arah utara sedangkan profil di Kalimantan Tengah angin bergerak ke arah barat laut. Pola *windrose* angin di Kalimantan Selatan bergerak ke arah barat laut sedangkan profil angin di Kalimantan Timur bergerak ke arah utara. Rata-rata kecepatan angin di pulau Kalimantan dominan berada pada kisaran $0 - 3 \text{ m s}^{-1}$.



Gambar 5. Trayektori Asap Mei 2006

Pola trayektori polutan dipengaruhi oleh angin yang berhembus dari Kalimantan Selatan yang bergerak ke arah barat laut. Ketika berada di atas propinsi Kalimantan Tengah angin mulai membawa asap kebakaran hutan yang terbentuk di wilayah Kalimantan Tengah. Angin membawa asap bergerak ke arah Kalimantan Barat yang kemudian akan dibelokkan ke arah utara. Pola trayektori yang berbelok di Kalimantan Barat serta rendahnya konsentrasi emisi polutan yang dilepaskan ke udara menyebabkan asap kebakaran hutan pada bulan Mei relatif cepat mengalami proses pengenceran.

▪ *Musim Kemarau*

Musim kemarau dalam penelitian ini diwakili oleh bulan Juli, yang merupakan puncak musim kemarau di hampir sebagian wilayah pulau Kalimantan. *Running TAPM* bulan Mei untuk tanggal 14 – 20 Juli 2006 dengan area kebakaran hutan yang terdeteksi sebanyak 24 area. Hasil visualisasi untuk bulan Juli 2006 ditampilkan dalam satu hari sementara untuk penggambaran yang lebih terperinci sepanjang waktu simulasi. Terjadinya peningkatan dalam penyebaran dan nilai konsentrasi asap kebakaran hutan dibandingkan dengan kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Mei. Penyebaran dan konsentrasi terbesar terlihat dari unsur karbon monoksida yang cukup pekat pada malam hari, tetapi pada siang hari konsentrasi polutan menurun. Namun, peningkatan konsentrasi dan penyebaran CO di udara relatif masih kecil dibandingkan dengan luasnya pulau Kalimantan, sehingga gambarnya tidak terlihat jelas.

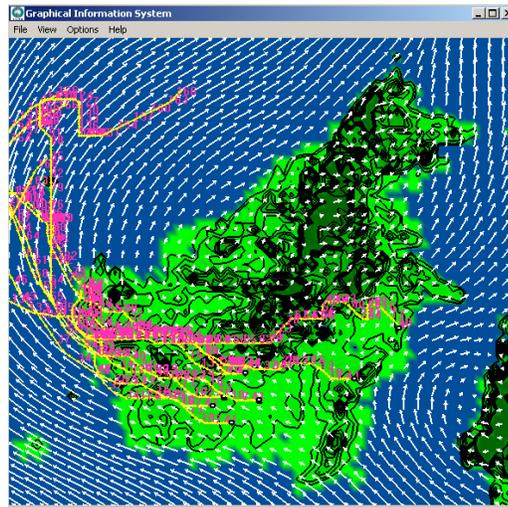
Konsentrasi polutan kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Juli semakin meningkat. Hal ini ditandai dengan peningkatan jumlah *hotspot*, peningkatan luas area kebakaran hutan serta tingginya laju emisi akibat jumlah biomassa yang terbakar semakin banyak. Peningkatan salah satu variabel ini akan mengakibatkan peningkatan secara linear terhadap tingkat konsentrasi polutan yang terkandung di udara.

Konsentrasi polutan terutama CO pada bulan Juli 2006 yang relatif tinggi menyebabkan asap dapat menyebar lebih jauh. Kekeringan yang terjadi di banyak wilayah di Kalimantan banyak mengakibatkan lahan bekas rawa gambut menjadi lebih mudah terbakar. Kalimantan merupakan pulau yang memiliki banyak sungai besar sehingga banyak daerah memiliki karakteristik tanah gambut yang merupakan penyimpan karbon yang sangat efektif. Tingginya kebakaran hutan yang terjadi di bekas rawa gambut menyebabkan kadar CO yang dilepaskan ke udara meningkat.

Tingginya kadar CO di udara juga dapat diakibatkan karena relatif panjangnya waktu tinggal gas CO di udara yang dapat bertahan hingga 2 bulan. Waktu tinggal $PM_{2,5}$ hanya bertahan paling lama hingga satu minggu, sedangkan NO_x memiliki waktu tinggal yang terpendek dibandingkan dengan waktu tinggal CO dan $PM_{2,5}$, hanya sekitar 1 hingga 4 hari.

Pola trayektori asap kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Juli 2006 dapat terlihat dengan baik. Pola trayektori digambarkan dengan 3 gambar karena input TAPM

maksimal hanya 10 area, sehingga apabila terdapat lebih dari 10 area maka *running* TAPM dipecah menjadi beberapa kali. Bulan Juli 2006, terdeteksi 24 area kebakaran hutan sehingga *running* TAPM dipecah menjadi tiga kali.



Gambar 6. Trayektori Asap Juli 2006

Arah trayektori asap kebakaran hutan bergerak ke arah barat kemudian ketika berada di atas Laut Cina Selatan sebagian asap kebakaran hutan berbelok arah menuju ke Kalimantan Utara dan Thailand., Peningkatan nilai konsentrasi akan mengakibatkan konsekuensi jangkauan asap kebakaran hutan juga akan semakin jauh ditambah dengan tingginya kecepatan angin maka akan mengakibatkan asap kebakaran hutan Kalimantan dapat mencapai daratan Malaysia dan Singapura. Kondisi topografi yang berbentuk badan air akan mempermudah proses transportasi asap kebakaran hutan, karena badan air memiliki nilai kekasaran permukaannya semakin rendah sehingga mengakibatkan gesekan terhadap angin akan semakin kecil (Prawirowardoyo, 1996).

▪ Musim Transisi 2

Musim transisi 2 merupakan musim transisi antara musim kemarau dan musim hujan, dalam penelitian ini diwakili oleh bulan September. *Running* TAPM bulan Mei untuk tanggal 18 - 24 September 2006 dengan area kebakaran hutan yang terdeteksi sebanyak 20 area. Hasil visualisasi untuk bulan September 2006 dapat ditampilkan dalam satu hari sementara untuk penggambaran yang lebih terperinci sepanjang waktu simulasi.

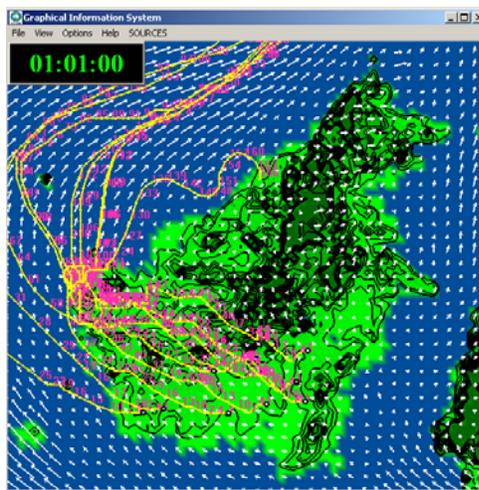
Konsentrasi dan penyebaran polutan dapat terlihat, konsentrasi polutan yang terdeteksi pada bulan September semakin meningkat baik untuk CO dan NO_x maupun untuk PM_{2.5}. Kondisi pencemaran partikulat pada bulan September semakin meningkat, terlihat pada gambar dan konsentrasi polutan warnanya semakin merah yang berarti konsentrasi polutan semakin meningkat. Kondisi pencemaran untuk gas CO juga meningkat terutama pada hari ketiga dimana konsentrasi polutan sudah berwarna oranye berarti kondisi pencemaran akibat kebakaran hutan semakin pekat.

Pencemaran udara yang diakibatkan oleh kebakaran hutan semakin meningkat, terutama di propinsi Kalimantan Tengah dimana kebakaran hutan merupakan hal yang sering terjadi. Polusi partikulat dan gas menyebabkan kondisi kualitas udara menurun. Praktek-praktek penebangan liar, yang menyebabkan terbukanya lahan-lahan gambut yang kering mempermudah terjadinya kebakaran, selain itu pembukaan lahan untuk pertanian maupun perkebunan kelapa sawit marak terjadi. Praktek *slash and burn* merupakan praktek pembukaan lahan yang termudah dan sangat ekonomis, sehingga banyak digunakan.

Bulan September 2006 merupakan salah satu musim kebakaran hutan dimana kondisi cuaca cukup mendukung terjadinya kebakaran hutan. Kondisi suhu udara yang relatif tinggi dan kondisi kelembaban udara kebakaran hutan. Kondisi suhu udara yang

relatif tinggi dan kondisi kelembaban udara yang rendah dapat memicu terjadinya kebakaran hutan yang semakin meluas.

Kondisi kestabilan udara pada malam hari sangat stabil sehingga menyebabkan konsentrasi udara tertahan di daerah sekitar sumber emisi sehingga menghambat proses pengenceran oleh atmosfer. Pada siang hari kondisi udara yang tidak stabil mengakibatkan udara mudah mengalami proses pengenceran dengan volum udara bersih yang lebih besar dibandingkan malam hari. Profil yang tergambar pada *windrose* sangat berkaitan dengan arah trayektori asap kebakaran hutan yang terjadi pada bulan September. Asap hasil kebakaran hutan yang terjadi di Kalimantan Selatan bergerak bersamaan pergerakan angin yang mengarah ke arah barat laut. Transportasi asap kemudian mengalami proses penambahan konsentrasi asap akibat kebakaran yang lebih banyak dan luas yang berada di wilayah Kalimantan Tengah dan Kalimantan Selatan.



Gambar 7. Trayektori Asap September 2006

Angin kemudian bergerak diatas Laut Cina Selatan, angin kemudian akan mengalami pembelokan akibat adanya hembusan angin dari daratan Asia Tenggara, tetapi angin yang berhembus dari Kalimantan Timur berhembus ke arah utara dengan kecepatan $1 - 3 \text{ m s}^{-1}$ menyebabkan asap kebakaran hutan terus bergerak ke arah utara.

Arah trayektori asap kebakaran hutan semakin bergerak ke arah barat laut dari pulau Kalimantan menuju daratan Asia Tenggara. Area kebakaran yang luas, laju emisi yang tinggi, dan konsentrasi polutan yang tinggi adalah faktor yang menyebabkan mengapa asap kebakaran hutan di Kalimantan pada bulan September dapat mencapai daratan Malaysia, Singapura, Thailand dan beberapa negara lainnya di kawasan Asia Tenggara.

▪ *Musim Hujan*

Musim hujan dalam penelitian ini diwakili oleh bulan Desember, yang merupakan puncak musim hujan di hampir sebagian besar wilayah pulau Kalimantan. *Running TAPM* bulan Desember untuk tanggal 6 - 12 Desember 2006 dengan area kebakaran hutan yang terdeteksi sebanyak 6 area. Hasil visualisasi untuk bulan Desember 2006 dapat ditampilkan dalam satu hari sementara untuk penggambaran yang lebih terperinci sepanjang waktu simulasi.

Kondisi konsentrasi polutan dan asap kebakaran hutan bulan Desember 2006 hampir serupa dengan bulan Mei 2006. Hal ini karena pada bulan Desember curah hujan telah cukup melimpah di sebagian besar wilayah Kalimantan sehingga terjadi proses *wash out* partikulat-partikulat dan *dilution* terhadap gas CO dan NO_x. Curah hujan juga mengakibatkan titik-titik api yang terbentuk padam sebelum menjadi area kebakaran yang lebih luas.

Kondisi kestabilan udara pada musim kemarau seperti pada bulan Juli dan bulan September dengan musim hujan seperti di bulan Mei dan Desember berbeda. Pada malam hari kondisi udara stabil, namun karena sedikitnya titik-titik *hotspot* yang memicu terjadinya kebakaran hutan, kecilnya area kebakaran hutan yang terjadi, serta

rendahnya laju emisi polutan paada bulan Desember menyebabkan asap kebakaran hutan tidak meluas seprti bulan Juli dan September.

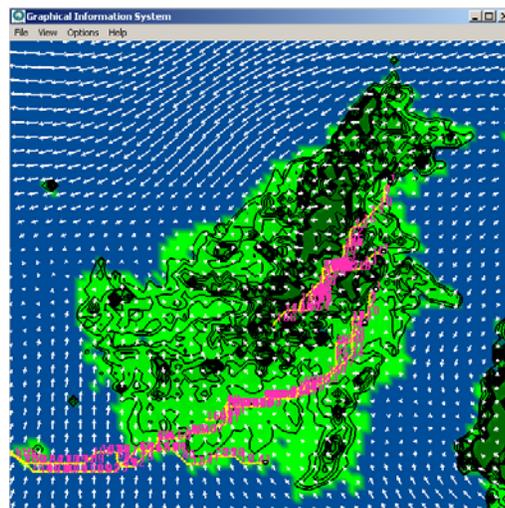
Kondisi kestabilan udara pada musim kemarau seperti pada bulaan Juli dan bulan September dengan musim hujan seperti di bulan Mei dan Desember berbeda. Pada malam hari kondisi udara stabil, namun karena sedikitnya titik-titik *hotspot* yang memicu terjadinya kebakaran hutan, kecilnya area kebakaran hutan yang terjadi, serta rendahnya laju emisi polutan paada bulan Desember menyebabkan asap kebakaran hutan tidak meluas seprti bulan Juli dan September.

Kondisi *mixing height* secara garis besar pun tidak terlalu jauh berbeda dengan kondisi pada musim kemarau, namun *mixing height* pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan dengan *mixing height* di musim hujan. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan gradien temperatur yang terjadi antara parsel udara yang mengandung polutan dengan lapisan udara di sekitarnya.

Kecepatan angin di bulan Desember teratur di antara keempat provinsi tersebut. Profil angin di Kalimantan Barat dominan bergerak ke arah barat daya dan arah tenggara, dengan kecepatan rata-rata berkisar antara 1 hingga 2 m s⁻¹. Profil angin di Kalimantan Tengah didominasi oleh pergerakan angin ke arah selatan dengan kecepatan rata-rata sebesar 1 hingga 2 m s⁻¹. Profil angin di Kalimantan Selatan juga didominasi oleh pergerakan angin ke arah selatan dengan kecepatan rata-rata berkisar antara 1 hingga 2 m s⁻¹. Profil angin di Kalimantan Timur bergerak ke bebearapa arah, tetapi dominan ke arah selatan. Kecepatan angin rata-rata di Kalimantan Timur pada bulan Desember hanya berkisar antara 0 hingga 1 m s⁻¹.

Trayektori asap kebakaran hutan yang terjadi pada bulan Desember bergerak ke arah barat daya Kalimantan. Laju emisi dan tingkat konsentrasi asap kebakaran hutan yang relatif kecil menyebabkan asap yang bergerak ke arah barat daya tersebut tidak mencapai negara tetangga. Kecepatan angin yang tidak setinggi bulan Juli dan September menyebabkan pengenceran asap terjadi lebih cepat sehingga asap tidak meluas.

Pola trayektori asap kebakaran hutan pada bulan Mei, Juli, dan September cenderung serupa satu sama lain. Arah trayektori asap kebakaran hutan bergerak ke arah barat laut kemudian ketika berada di atas Laut Cina Selatan sebagian asap kebakaran hutan berbelok arah menuju ke Kalimantan Utara dan Thailand. Pola trayektori asap kebakaran hutan pada bulan Desember berbeda dibandingkan dengan bulan lainnya. Arah trayektori asap kebakaran hutan bergerak ke arah barat daya ke daratan Sumatera dan bagian Selatan Malaysia dan Singapura, namun kemudian trayektori asap kebakaran hutan tersebut bergerak ke arah selatan.



Gambar 7. Trayektori Asap Desember 2006

Pola pergerakan angin yang membawa polutan dipengaruhi oleh gradien tekanan, dan gaya Coriolis. Pada bulan Mei, Juli, dan September Belahan Bumi Utara memiliki tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan Belahan Bumi Selatan sehingga udara bergerak ke arah utara, sedangkan pada bulan Desember terjadi kondisi sebaliknya.

Menurut Prawirowardoyo (1996) gaya Coriolis adalah gaya fiktif yang terjadi akibat rotasi bumi terhadap sumbunya. Angin yang bergerak dari ekuator ke arah Belahan Bumi Utara akan mengalami pembelokkan ke arah kiri dari setiap gerakan, sedangkan angin yang bergerak dari arah ekuator ke Belahan Bumi Selatan akan mengalami pembelokkan ke arah kanan dari arah kecepatan. Hal ini menyebabkan pola trayektori asap kebakaran hutan tidak sama dengan pola angin *windrose*, sehingga pada bulan Mei, Juli, dan September asap mengarah ke arah barat laut terlebih dahulu baru kemudian bergerak ke arah utara dan sebaliknya pada bulan Desember asap kebakaran hutan mengarah ke arah barat daya terlebih dahulu baru kemudian bergerak ke arah selatan.

Korelasi Konsentrasi Polutan dan Faktor Meteorologis

Hasil analisis korelasi antara faktor meteorologi dan konsentrasi polutan menghasilkan kisaran angka -0,91 hingga 0,85. Nilai korelasi untuk komponen suhu udara berkisar -0,66 hingga -0,91; hal ini menunjukkan peningkatan suhu bersamaan dengan penurunan konsentrasi polutan. Peningkatan suhu pada siang hari mengakibatkan turbulensi meningkat sehingga terjadi pengenceran. Kelembaban udara memiliki nilai korelasi berkisar 0,65 hingga 0,85; berarti karena peningkatan kelembaban udara di atmosfer akan mengakibatkan peningkatan konsentrasi polutan, hal ini karena polutan terperap didalam uap air. Hal ini sesuai pula dengan penelitian Turyanti dan Santikayasa (2006), yang menunjukkan fluktuasi kelembaban udara berkorelasi positif dengan konsentrasi polutan baik CO, NO_x, SO₂, dan PM₁₀.

Nilai korelasi kecepatan angin dengan konsentrasi polutan berkisar dari -0,45 hingga -0,65. Pada saat kecepatan angin tinggi maka konsentrasi polutan rendah karena proses dispersi polutan berjalan lebih baik. Radiasi matahari total memiliki nilai korelasi negatif dengan konsentrasi polutan, yaitu berkisar -0,61 hingga -0,70. Peningkatan radiasi matahari akan menyebabkan penurunan konsentrasi polutan akibat suhu meningkat. Analisis korelasi antara intensitas hujan dengan konsentrasi polutan menunjukkan nilai korelasi yang relatif kecil (-0,10 hingga 0,40), hal ini disebabkan intensitas hujan di Kalimantan tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap konsentrasi polutan, rata-rata intensitas hujan hanya berkisar 1,25 mm hr⁻¹. Sementara itu *mixing height* memiliki nilai korelasi antara -0,55 hingga -0,85; yang menunjukkan semakin tinggi *mixing height* maka konsentrasi polutan akan semakin tinggi, akibatnya pencampuran yang efektif. Nilai korelasi antara stabilitas atmosfer dan konsentrasi polutan sangat kecil (-0,10 hingga 0,10), menunjukkan stabilitas atmosfer dalam kasus ini tidak mempengaruhi fluktuasi konsentrasi polutan. Pada kasus kebakaran hutan nilai konsentrasi polutan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor stabilitas atmosfer saja, tetapi juga sangat ditentukan oleh laju emisi kebakaran hutan yang dalam penelitian ini nilai laju emisi kebakaran hutan stabil selama waktu simulasi.

KESIMPULAN

Bulan Juli dan September merupakan puncak terjadinya kebakaran hutan di pulau Kalimantan pada tahun 2006. Area kebakaran hutan pada bulan Juli terjadi sebanyak 24 area kebakaran hutan. Bulan September terjadi 20 area luas kebakaran hutan. Puncak laju emisi kebakaran hutan terjadi pada bulan September, dimana laju emisi PM_{2,5}, NO_x, dan CO mencapai 2164,47 g s⁻¹, 577,41 g s⁻¹, 5216,62 g s⁻¹. Secara umum laju emisi CO merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan dua unsur lainnya. Hal ini disebabkan karena karakteristik hutan di Indonesia yang lembab sehingga menyebabkan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna dan kondisi tanah pulau Kalimantan didominasi oleh tanah gambut. Konsentrasi PM_{2,5}, NO_x, dan CO terbesar terjadi pada malam hari, sedangkan pada siang hari konsentrasinya lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh kondisi kestabilan atmosfer dan *mixing height*. Pada malam hari kondisi udara stabil dan *mixing height* yang rendah menyebabkan tingginya konsentrasi polutan di atmosfer.

Pola trayektori pada bulan Mei, Juli, dan September relatif sama, asap kebakaran hutan bergerak ke arah barat laut kemudian utara. Pola trayektori bulan Desember berbeda dibanding bulan lainnya, dimana asap bergerak ke arah barat daya dan selatan. Hal ini disebabkan akibat adanya perbedaan pola arah angin. Nilai korelasi untuk komponen suhu udara dengan nilai berkisar -0,66 hingga -0,91; kelembaban udara dengan nilai 0,65 hingga 0,85; kecepatan angin dengan nilai -0,45 hingga -0,65; radiasi matahari total dengan nilai berkisar -0,61 hingga -0,70; intensitas hujan -0,10 hingga 0,40; *mixing height* memiliki nilai korelasi antara -0,55 hingga -0,85; dan nilai stabilitas atmosfer sekitar -0,10 hingga 0,10. Faktor meteorologis yang memiliki pengaruh besar terhadap pola trayektori polutan adalah arah dan kecepatan angin. Nilai korelasi kecepatan angin terhadap konsentrasi polutan menunjukkan nilai berkisar -0,45 hingga -0,65, nilai negatif menunjukkan bahwa ketika kecepatan angin tinggi maka konsentrasi polutan akan semakin rendah. Faktor meteorologis yang mempengaruhi konsentrasi polutan di suatu daerah adalah stabilitas atmosfer dan *mixing height*. Nilai korelasi *mixing height* berhubungan dengan faktor meteorologis yang mempengaruhi *mixing height* seperti suhu udara, kelembaban udara, dan radiasi matahari total. Nilai korelasi *mixing height* berkisar antara -0,55 hingga -0,85, sehingga pada saat *mixing height* tinggi maka konsentrasi polutan akan rendah, begitupun sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeeb, F. 2002. *Evaluation of The Air Pollution Model TAPM (version 2) for Adelaide*. [akses : 18 September 2007].
- Bagheera. 2007. *Spotlight On : Tropical rainforests*. <http://bagheera.com/inthewild/spotlight/tropicalrainforests.htm>. [akses : 11 Juni 2007].
- Badan Planologi Kehutanan. 2007. *Luas Areal Hutan Indonesia Tahun 2006*. Departemen Kehutanan RI, Jakarta.
- EPA. 2007. *What is CO? Where does CO Come from?*. <http://www.epa.gov/air/urbanair/co/what1.html>. [akses : 13 November 2007].
- Fuller, M. 1991. *Forest Fires : An Introduction to Wildland Fire Behaviour, Management, Firefighting and Prevention*. John Wiley & Sons, Inc., Toronto.
- Glover, D., T. Jessup. 1999. *Indonesian's Fires and Haze : The Cost of Catastrophe*. Institute of Southeast Asian Studies, Singapore.
- Hewitt, C.N., A.V. Jackson. 2003. *Handbook of Atmospheric Sciences*. Blackwell Publishing Co., Oxford.
- Hirdman. D. 2006. *Sensitivity Analysis of the Mesoscale Air Pollution Model TAPM*. [akses : 16 Juli 2007].
- Hurley, P.J. 2005. *The Air Pollution Model (TAPM) version 3 User Manual*. CSIRO. Australia.
- Hyde, E. B. 2002. *Southeast Asian Rainforest*. http://www.blueplanetbiomes.org/se_asian_rnfrst.htm. [akses : 11 Juni 2007].
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2001. *Laporan Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia Jilid 1; Dampak, Faktor dan Evaluasi*. Jakarta : Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia
- Liu, D.H.F., B.G. Liptak. 2000. *Air Pollution*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Lutgens, F.K., E.J. Tarbuck. 2004. *The Atmosphere*. 9th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Michael G,. 2001. *Tropical Rainforest*. <http://www.blueplanetbiomes.org/rainforest.htm>. [akses : 11 Juni 2007].
- Prawiwardoyo, S. 1996. *Meteorologi*. ITB Press, Bandung.
- Project FireFight South East Asia. 2003. *Membakar Lahan Gambut Sama Artinya dengan Membuat Polusi Asap*. Burning Issues No 7, Mei 2003.

- Pyper, W. 2002. *Looking into Malaysia's Haze*. www.publish.csiro.au/?act=view_file&file_id=EC110p5.pdf. [akses : 5 Februari 2008].
- Rico, H. 2004. *Bioregion Kalimantan*. <http://www.walhi.or.id/bioregion/kal/>. [akses : 13 September 2007].
- Turyanti, A., I.P. Santikayasa. 2006. Analisis Pola Unsur Meteorologi dan Konsentrasi Polutan di Udara Ambien (Studi Kasus Jakarta dan Bandung). *J. Agromet Indonesia* 20 (2): 25-37.
- Saharjo, B.H. 2003. *Kebakaran Hutan dan Asap*. <http://kompas.com/kompas-cetak/0310/20/ilpeng/>. [akses : 10 September 2007].
- Seinfeld, J.H. 1986. *Atmospheric Chemistry and Physics : Air Pollution*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Sumaryati. 2007. *Penetapan Beban Emisi Maksimum CO di Kawasan Dayeuh Kolot*. Tesis. Institut Teknologi Bandung.
- Van der Werf, G.R., I. Giglio, J. T. Randerson, G. J. Collatz, P. Kasibhatla. 2006. *Interannual variability of global biomass burning emissions from 1997-2004*. [akses : 10 September 2007].
- WWF. 2007. *Kebakaran Hutan dan Lahan*. http://www.wwf.or.id/index.php?fuseaction=whatwedo.forest_fire&language=i. [akses : 26 Maret 2007]

VARIABILITAS DATA RADIASI MATAHARI DALAM INTERVAL PENDEK DI STASIUN PEMANTAU ATMOSFER GLOBAL BUKIT KOTOTABANG

Herizal, Yosfi Andri, dan Alberth Christian Nahas
Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang
e-mail: herizal_hamzah@yahoo.com

ABSTRACT

In order to evaluate solar radiation data generated from satellite, it is important to understand the short term variability of solar radiation from ground measurement. The aim of this study is to compare short term solar radiation data, which is assumed as satellite data, with hourly data. Data being used in this study were global and diffuse solar radiation in 2008-2009 at Bukit Kototabang. Three months for each year, which are April, July, and November, were selected as representation of wet and dry condition at the site. All of the data were obtained from QPSP Eppley Pyranometer. The first three minutes average observation data for each hour, taken from ground measurement were assumed as hourly solar radiation data from satellite observation. These data were then compared by hourly solar radiation data from ground measurement. Result of comparison shows us that for Bukit Kototabang, three-minute average observation data were in good agreement with hourly data for April and July. For November, an opposite result was yielded, as results for this month in 2008 and 2009 estimated the highest and lowest determination coefficient, which is 0.86 and 0.56, respectively for global solar radiation; 0.86 and 0.49, respectively for diffuse solar radiation. Cloud condition also played an important role in estimating solar radiation. It was found that more frequent overcast condition in 2008 gives a better estimation than less overcast that was observed in 2009.

Keywords: *Global solar radiation, diffuse solar radiation, satellite, Bukit Kototabang.*

PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber energi utama bagi sebagian besar proses-proses yang terjadi di permukaan bumi. Sumber energi lain seperti bintang dan bagian dalam bumi relatif kecil dibanding dengan energi yang berasal dari matahari. Oleh karena itu dapat dikatakan matahari merupakan satu-satunya sumber energi bagi proses-proses yang terjadi di permukaan bumi. Energi matahari dihasilkan oleh proses fusi nuklir yang terjadi ketika hidrogen dikonversi menjadi helium didalam bagian dalam matahari. Selanjutnya energi merambat keluar ke permukaan matahari untuk kemudian diradiasikan ke ruang angkasa dimana sebagian di terima permukaan bumi.

Secara tradisional energi radiasi matahari telah dimanfaatkan manusia sejak dulu kala untuk proses pengeringan dalam kegiatan rumah tangga dan proses pengeringan dalam kegiatan pertanian pasca panen. Radiasi matahari yang diterima permukaan bumi merupakan masukan fundamental untuk banyak aspek di bidang klimatologi, hidrologi, biologi dan arsitektur (Santamouris *et al.*, 2009). Selain itu radiasi matahari juga merupakan parameter penting dalam aplikasi solar energi dan pembangkit listrik. Meskipun data radiasi matahari cukup penting, namun belum begitu banyak stasiun meteorologi yang mengukur secara kontinyu radiasi matahari, terutama di negara-negara berkembang termasuk Indonesia.

Untuk mengatasi kekurang data dan informasi mengenai radiasi matahari, beberapa pemodel iklim telah melakukan pemodelan untuk mendapatkan data radiasi matahari yang diterima permukaan bumi dengan memanfaatkan data-data unsur cuaca permukaan yang banyak diamati oleh stasiun-stasiun meteorologi, seperti data temperatur, kelembaban, lama penyinaran, tekanan udara dll. Selain menggunakan

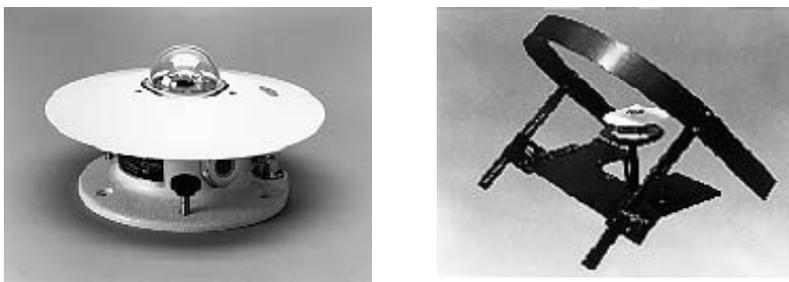
data-data cuaca permukaan beberapa pemodel iklim memanfaatkan hasil observasi satelit cuaca untuk menurunkan data radiasi matahari.

Data radiasi matahari yang diturunkan dari observasi satelit cuaca memiliki kelebihan karena dapat meliputi pada area yang luas dan pada tempat-tempat yang sulit dilakukan pengukuran karena berada di lokasi terpencil. Akan tetapi data radiasi yang dihasilkan oleh observasi satelit cuaca perlu divalidasi karena observasi satelit bekerja berdasarkan prinsip pemotretan bumi sesaat (*snaphshot*) yang belum tentu mewakili data untuk suatu interval waktu. Untuk mengevaluasi data radiasi matahari yang dihasilkan oleh observasi satelit kajian ini mencoba mensimulasikan apakah data ringkas yang didapat dari suatu pemotretan bisa digunakan untuk mewakili data dalam satu interval waktu. Dalam kajian ini data rerata 3 menit pertama pada tiap-tiap jam diasumsikan sebagai data yang dihasilkan oleh pemotretan satelit, sedangkan data rerata 1 jam digunakan untuk validasi asumsi tersebut. Untuk keperluan tersebut beberapa instrumen tes statistik digunakan seperti: *mean bias error* (MBE), *root mean square error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2) digunakan.

METODE PENELITIAN

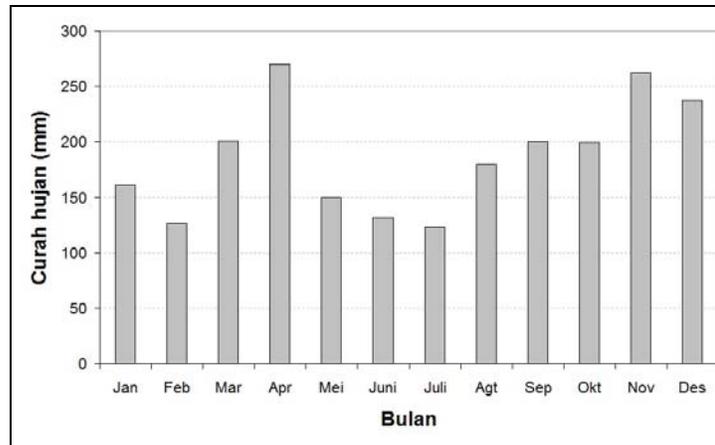
Data

Data untuk penelitian ini diambil dari unit monitoring radiasi matahari Stasiun Pemantau Atmosfer Global (SPAG) Bukit Kototabang yang terletak di Kabupaten Agam Sumatera Barat. Berdasarkan kordinat geografi Bukit Kototabang berada pada 100.32 BT, 0.20 S dan pada ketinggian 865 meter di atas permukaan laut. Data radiasi matahari global diukur menggunakan piranometer QPSP Eppley, demikian juga untuk data radiasi baur. Namun untuk mendapatkan data radiasi baur piranometer Eppley QPSP dilengkapi dengan pita perintang radiasi langsung (*shadow band*) Data-data tersebut disampel setiap interval satu detik dan kemudian data rerata 3 menit disimpan dalam sebuah datalogger.



Gambar 1. Piranometer tanpa shadow band (kiri) untuk mengukur radiasi global dan piranometer dengan shadow band untuk mengukur radiasi baur (kanan)

Penelitian pada tulisan ini mengambil data hasil observasi tahun 2008-2009. Penelitian ini hanya mengambil data bulan April, Juli dan November untuk diolah lebih lanjut. Pengambilan sampel data pada bulan-bulan tersebut disesuaikan dengan tipologi iklim di lokasi penelitian. Lokasi penelitian terletak di dekat garis ekuator. Karena terletak di sekitar garis ekuator maka Bukit Kototabang memiliki tipologi iklim yang ditandai oleh dua puncak musim hujan dalam satu tahun. Puncak musim hujan pertama terjadi pada bulan April, sedangkan puncak musim hujan kedua terjadi pada bulan November. Antara puncak musim hujan pertama dan kedua terdapat selang kering yang terjadi pada bulan Juli. Tipologi iklim di Bukit Kototabang dijadikan acuan dalam mengambil sampel data radiasi matahari yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Pola curah hujan Bukit Kototabang periode 1996-2005

Data rerata 3 menit pertama dalam setiap jam observasi diasumsikan sebagai data yang menggambarkan data basis 1 jam yang diturunkan dari hasil pemotretan oleh satelit, selanjutnya disebut dengan data radiasi matahari model. Sedangkan data radiasi matahari rerata 1 jam yang dihasilkan oleh pengukuran digunakan untuk validasi data model tersebut, untuk melihat sejauh mana kesesuaian antara model dengan hasil pengukuran. Dalam penelitian ini diambil dua parameter radiasi matahari yang diukur oleh unit monitoring radiasi matahari SPAG Bukit Kototabang untuk dikaji, yaitu data radiasi matahari global dan data radiasi baur. Radiasi global adalah radiasi matahari yang diterima permukaan bumi yang berasal dari seluruh lengkung langit. Sedangkan radiasi baur adalah radiasi matahari yang diterima permukaan bumi yang berasal dari hamburan/pantulan molekul udara, aerosol dan awan-awan yang ada di atmosfer.

Analisis Statistik

Mean Bias Error (MBE) didefinisikan sebagai berikut:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{est} - Q_{mes})}{N} \quad (1)$$

dengan: Q_{est} = data radiasi matahari model
 Q_{mes} = data radiasi matahari observasi
 N = jumlah data

Dalam penelitian ini Q_{est} adalah data radiasi matahari rerata selama interval 3 menit pertama pada setiap awal waktu (data radiasi matahari model) sedangkan Q_{mes} adalah data radiasi matahari rerata selama interval 1 jam. MBE adalah indikator rata-rata deviasi harga estimasi dari harga pengukuran terkait. MBE dapat memberikan performa jangka panjang dari model estimasi, semakin kecil nilai MBE maka model estimasi semakin baik, MBE dapat bernilai positif dan negatif. Idealnya MBE mempunyai nilai nol. Nilai MBE positif memberikan informasi kepada kita nilai estimasi berada dalam kondisi lebih besar dari seharusnya (*over estimated*), sedangkan jika nilai MBE negatif berarti nilai estimasi ada dalam keadaan lebih kecil dari seharusnya (*under estimated*).

Root Mean Square Error (RMSE) didefinisikan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{est} - Q_{mes})^2}{N}} \quad (2)$$

RMSE selalu mempunyai nilai positif dan RMSE nol adalah RMSE ideal. Nilai RMSE memberikan informasi kepada kita performa jangka pendek dan ukuran dari variasi nilai estimasi sekitar harga pengukuran. Semakin kecil nilai RMSE maka nilai estimasi semakin akurat.

Koefisien determinasi, R^2 , menggambarkan hubungan antara data model dengan data hasil pengukuran. Jika koefisien determinasi mempunyai nilai mendekati satu berarti maka ada korelasi yang kuat antara data radiasi model dengan data radiasi hasil pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

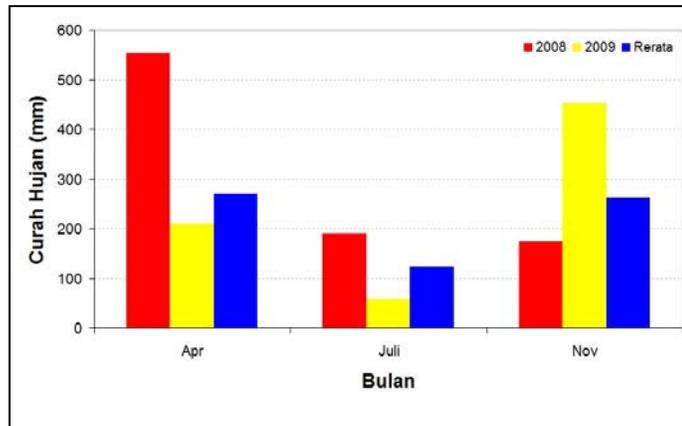
Radiasi Global

Hasil uji statistik untuk radiasi global menunjukkan nilai prosentase MBE berkisar antara -2.78 hingga -6.30, nilai prosentase RMSE berkisar antara 29.10 hingga 67.08 dan nilai R^2 berkisar antara 0.56 hingga 0.86. Nilai MBE rata-rata kurang dari 10% (0.01), artinya secara umum ada kesesuaian antara radiasi global model dengan radiasi global pengukuran. Tanda negatif pada nilai tersebut menunjukkan hasil model memberikan estimasi nilai radiasi matahari lebih rendah daripada hasil observasi. Namun demikian, variabilitas nilai RMSE yang relatif besar mengindikasikan hasil estimasi radiasi matahari belum terlalu baik. Koefisien determinasi R^2 untuk seluruh model berada di atas 0.70, kecuali untuk November 2009 koefisien determinasi R^2 0.56. Secara umum, berdasarkan koefisien determinasi ini, model memberikan kecenderungan yang sama dengan hasil observasi. Tabel 1 merangkup hasil uji statistik data radiasi matahari global.

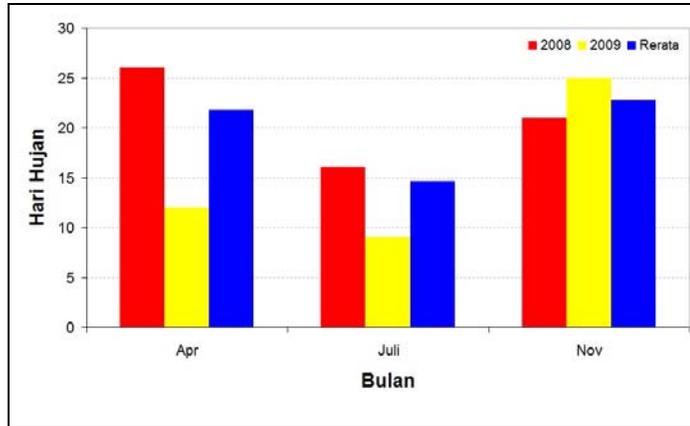
Tabel 1. Uji statistik data radiasi matahari global

Tahun	Bulan	% MBE	% RMSE	R^2
2008	April	-0.0278	0.3371	0.74
	Juli	-0.0388	0.3064	0.85
	November	-0.0540	0.2910	0.86
2009	April	-0.0590	0.4350	0.76
	Juli	-0.0380	0.4520	0.73
	November	-0.0630	0.6708	0.56

Seperti ditunjukkan pada Tabel 1 di atas, November 2008 memberikan hasil uji statistik yang paling baik, dengan koefisien determinasi tertinggi dan nilai prosentase terendah di antara bulan lainnya. Kebalikannya, hasil estimasi pada November 2009 memberikan hasil yang paling tidak sesuai. Pengukuran intensitas radiasi matahari sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan perawanan. Kondisi perawanan dapat dianalisis salah satunya dari jumlah curah hujan dan hari hujan. Jumlah curah hujan dan hari hujan di Bukit Kototabang pada periode observasi ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Perbandingan jumlah curah hujan periode observasi dengan rata-rata tahun 1996-2005

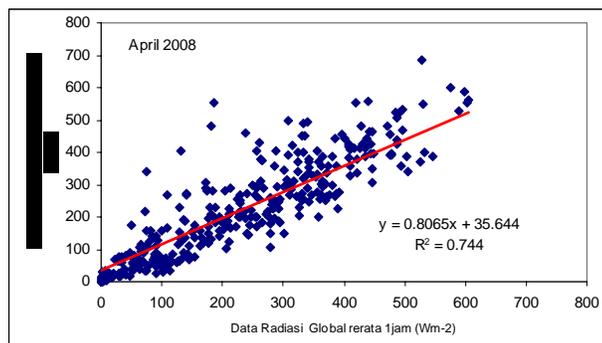


Gambar 4. Perbandingan jumlah hari hujan periode observasi dengan rata-rata tahun 2000-2005

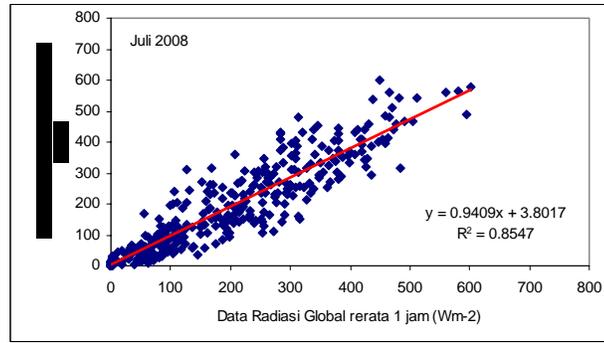
Jumlah curah hujan yang tinggi menandakan sering kali kondisi cuaca dalam keadaan *overcast*. Kondisi ini mempengaruhi intensitas radiasi matahari yang diterima oleh sensor. Yang menjadi perhatian pada periode observasi ini adalah pada bulan November. Hasil uji statistik telah memperlihatkan bahwa estimasi model pada bulan ini untuk tahun 2008 dan 2009 memberikan hasil yang paling sesuai dan tidak sesuai. Dilihat dari *trend*-nya, baik dari segi jumlah curah hujan dan hari hujan, bulan November tidak mengikuti *trend* yang ditunjukkan oleh bulan April dan Juli. Pada tahun 2008, kondisi jumlah curah hujan maupun hari hujan untuk bulan April dan Juli adalah di atas rata-rata. Sedangkan untuk bulan November, kondisinya di bawah rata-rata. Sementara itu, untuk tahun 2009, *trend* jumlah curah hujan dan hari hujan bulan April dan Juli adalah di bawah normal, tetapi pada bulan November, kondisinya di atas normal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa estimasi pada bulan November tidak memberikan hasil yang konsisten, yang sedikit banyak dipengaruhi oleh pola curah hujan dan hari hujan.

Curah hujan yang turun di Bukit Kototabang pada tahun 2008 dan 2009 berturut-turut sebesar 3369 mm dan 2889 mm. Sementara itu, hari hujan di Bukit Kototabang pada periode yang sama adalah sebanyak 223 hari dan 195 hari. Jika dipersempit untuk bulan April, Juli, dan November, jumlah curah hujan dan hari hujan pada tiga bulan tersebut di tahun 2008 adalah sebesar 306.1 mm dan 63 hari. Sedangkan untuk tahun 2009 berturut-turut sebesar 240.4 mm dan 46 hari. Tahun 2008 cenderung lebih basah daripada tahun 2009, mengindikasikan pada tahun ini, kondisi *overcast* lebih sering dijumpai. Apabila kondisi ini dihubungkan dengan nilai RMSE dan koefisien determinasi, hasil estimasi yang lebih baik diberikan oleh data radiasi matahari model pada kondisi *overcast* yang lebih tinggi.

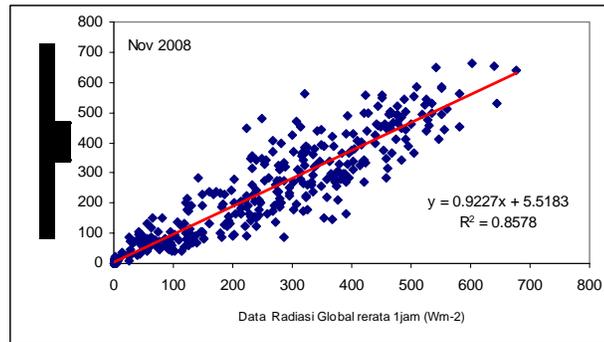
Perbandingan data radiasi matahari global hasil model dan observasi bulan April, Juli, dan November untuk tahun 2008 dan 2009 diperlihatkan pada Gambar 5 sampai 10.



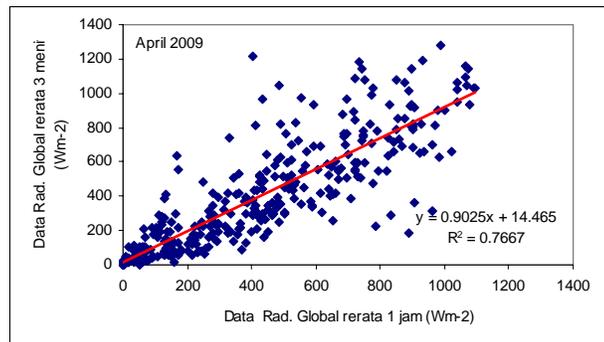
Gambar 5. Perbandingan data radiasi matahari global bulan April 2008



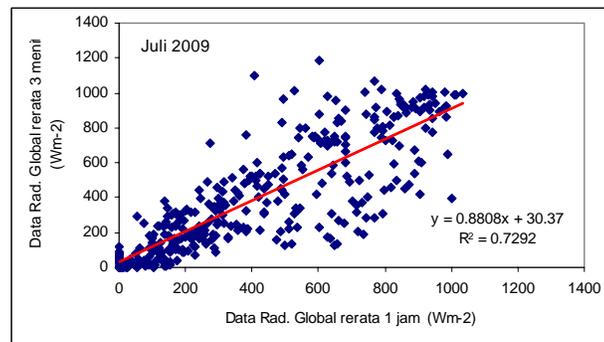
Gambar 6. Perbandingan data radiasi matahari global bulan Juli 2008



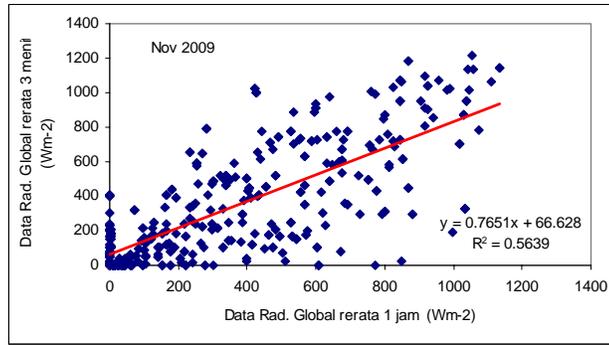
Gambar 7. Perbandingan data radiasi matahari global bulan November 2008



Gambar 8. Perbandingan data radiasi matahari global bulan April 2009



Gambar 9. Perbandingan data radiasi matahari global bulan Juli 2009



Gambar 10. Perbandingan data radiasi matahari global bulan November 2009

Radiasi Baur

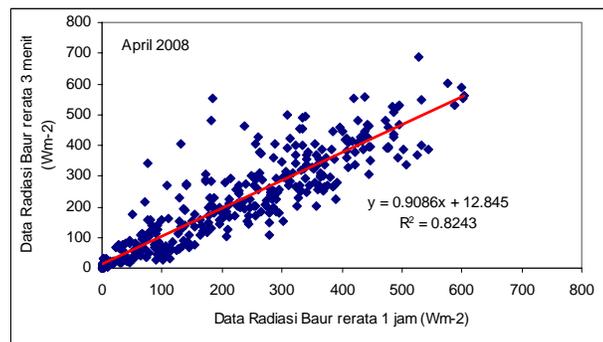
Besarnya prosentase MBE untuk data radiasi baur berkisar antara -2.79 hingga -5.37, prosentase RMSE berkisar antara 29.06 sampai 61.36. Sementara itu, nilai koefisien determinasi berdasarkan data hasil model berada di kisaran 0.49 – 0.86. Secara umum ada kesesuaian antara nilai radiasi baur menurut estimasi (rerata selama interval 3 menit pertama) dengan radiasi baur hasil pengukuran (rerata selama interval 1 jam). Hal ini ditunjukkan nilai prosentase MBE seluruh sampel data kurang dari 10%. Seperti halnya pada radiasi global, hasil estimasi radiasi baur juga memberikan nilai yang lebih rendah daripada data observasi, yang ditunjukkan oleh tanda negatif pada nilai MBE.

Koefisien determinasi R^2 untuk seluruh model diatas 0.7, kecuali untuk bulan November 2009 ($R^2 = 0.49$). Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang cukup antara data radiasi baur estimasi dengan data radiasi global pengukuran kecuali untuk bulan November 2009. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil estimasi pada radiasi global juga sangat mungkin mempengaruhi radiasi baur. Hal ini ditunjukkan pada kemiripan uji statistik antara kedua jenis radiasi, seperti yang diperlihatkan oleh Tabel 2.

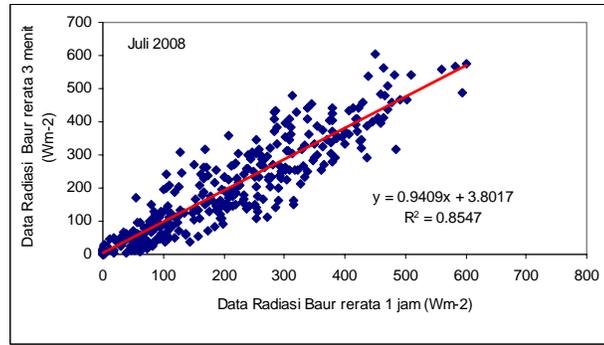
Tabel 2. Uji statistik data radiasi matahari baur

Tahun	Bulan	% MBE	% RMSE	R^2
2008	April	-0.0279	0.3370	0.82
	Juli	-0.0388	0.3064	0.85
	November	-0.0537	0.2906	0.86
2009	April	-0.0495	0.3787	0.78
	Juli	-0.0350	0.3913	0.74
	November	-0.0410	0.6136	0.49

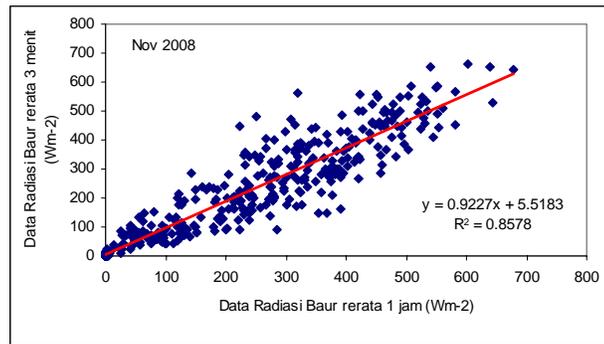
Perbandingan data radiasi matahari global hasil model dan observasi bulan April, Juli, dan November untuk tahun 2008 dan 2009 diperlihatkan pada Gambar 11 sampai 16.



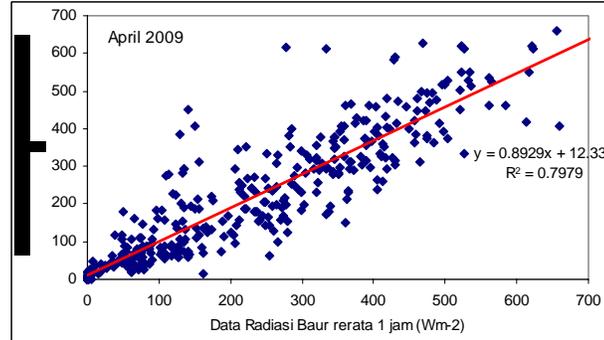
Gambar 11. Perbandingan data radiasi matahari global bulan April 2008



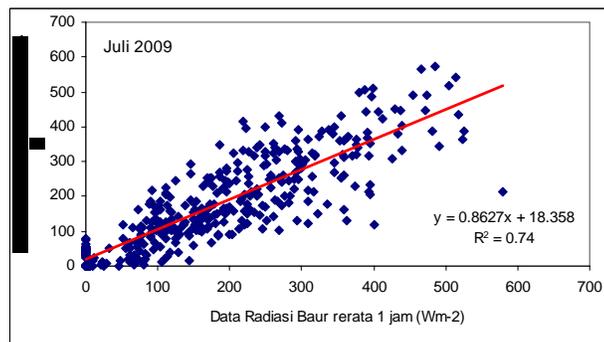
Gambar 12. Perbandingan data radiasi matahari global bulan Juli 2008



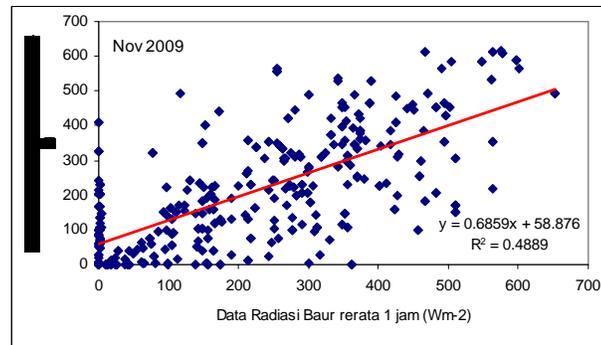
Gambar 13. Perbandingan data radiasi matahari global bulan November 2008



Gambar 14. Perbandingan data radiasi matahari global bulan April 2009



Gambar 15. Perbandingan data radiasi matahari global bulan Juli 2009



Gambar 16. Perbandingan data radiasi matahari global bulan November 2009

KESIMPULAN

Variabilitas data radiasi matahari di Bukit Kototabang, baik untuk radiasi matahari global dan baur, memperlihatkan hasil yang cukup baik antara data model dengan data observasi. Data model yang merupakan asumsi dari hasil citra satelit secara umum memiliki tingkat kesesuaian yang cukup baik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai prosentase MBE yang cukup rendah, berkisar antara 2 – 6%. Namun demikian, hasil estimasi model tersebut belum terlalu baik, yang diperlihatkan oleh besarnya nilai RMSE. Dari tiga bulan yang dijadikan sebagai periode observasi, hanya bulan November yang memberikan variabilitas nilai radiasi matahari yang tidak konsisten, sedangkan untuk bulan April dan Juli, hasilnya cukup konsisten. Faktor yang menyebabkan hasil ini salah satunya adalah kondisi cuaca di Bukit Kototabang. Hasil lainnya yang diperoleh adalah periode 2008 yang lebih basah daripada tahun 2009 memberikan hasil estimasi yang lebih baik, ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

A.M. Al-Sahili, M Maylaa, Kadum and A.J. Mohammed. 2010. Estimation of Global Solar radiation on Horizontal Surface using Routine Meteorological Measurement for Different Cities in Iraq. *Asian Journal of Scientific Research*.

Iqbal, M. 1983, *Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Toronto, Canada.

Katiyar, A.K., A. Kumar, C.K. Pandey, B. Das. 2010. A Comparative study of monthly mean daily clear sky radiation over India. *International Journal of Energy and Environment*.

Santamouris M. and G. Mihalakakou. 2009. Modeling the Global Solar Radiation on the Earth's Surface Using Atmospheric Deterministic and Intelligent Data-Driven Techniques. *Journal of Climate*.

Vignola, F. 2002. *Variability of Solar radiation Data over Short Time Intervals*. US DOE National Technology Laboratory.

PENGARUH LETUSAN GUNUNG SINABUNG TERHADAP PENGUKURAN DEPOSISI ASAM DI BUKIT KOTOTABANG

Agusta Kurniawan

Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang
e-mail: agusta6872@plasa.com

ABSTRACT

Impact of Mount Sinabung eruption on 28 August 2010 toward acid deposition parameters measured at Bukit Kototabang has been done. Two types of acid deposition were used on assessing the impact: dry deposition (SO_2 , NO_x , and O_3) and wet deposition (pH and conductivity of rain water). Data were selected from two weeks of eruption, starting from 28 August 2010. For comparison, data before eruption were selected from database dated before 28 August 2010. Result showed that the eruption did not affect acid deposition parameters. Simulation of volcanic ash trajectory from NOAA HYSPLIT Volcanic Ash also suggested that the ash moved westerly, spreading away from Bukit Kototabang.

Keywords: *Mount Sinabung, Bukit Kototabang, acid deposition, volcanic ash.*

PENDAHULUAN

Salah satu kepedulian lingkungan saat ini adalah Fenomena Hujan Asam. Hujan asam adalah suatu masalah lingkungan yang serius yang harus benar-benar dipikirkan oleh umat manusia. Hujan asam merupakan istilah umum untuk menggambarkan turunnya asam dari atmosfer ke bumi. Sebenarnya turunnya asam dari atmosfer ke bumi bukan hanya dalam kondisi “basah” tetapi juga “kering”. Sehingga dikenal pula dengan istilah deposisi (penurunan/pengendapan) basah dan deposisi kering.

Deposisi basah mengacu pada hujan asam, kabut dan salju. Ketika hujan asam ini mengenai tanah, ia dapat berdampak buruk bagi tumbuhan dan hewan, tergantung dari konsentrasi asamnya, kandungan kimia tanah, *buffering capacity* (kemampuan air atau tanah untuk menahan perubahan pH), dan jenis tumbuhan/hewan yang terkena. Deposisi kering mengacu pada gas dan partikel yang mengandung asam. Sekitar 50% keasaman di atmosfer jatuh kembali ke bumi melalui deposisi kering. Kemudian angin membawa gas dan partikel asam tersebut mengenai bangunan, mobil, rumah dan pohon. Ketika hujan turun, partikel asam yang menempel di bangunan atau pohon tersebut akan terbilas, menghasilkan air permukaan (*run off*) yang asam.

Air hujan menjadi komponen pokok pada siklus hidrologi dan memegang peranan penting dalam siklus pelarutan bahan-bahan kimia di alam. Air hujan juga berperan sebagai pencuci berbagai polutan yang ada di atmosfer, dengan cara membawa polutan tersebut dari udara ke permukaan tanah dan ke permukaan air.

Penyebab hujan asam ditinjau dari sumbernya ada dua, yaitu proses alamiah dan akibat aktivitas antropogenik manusia. Akibat aktivitas antropogenik manusia, misalnya: cerobong asap pabrik, pembangkit listrik tenaga batubara, pabrik bahan-bahan kimia dan kendaraan bermotor. Sedangkan proses alamiah, misalnya: letusan gunung meletus, kebakaran hutan.

Gunung Sinabung berlokasi di Dataran Tinggi Karo, Sumatera Utara, merupakan salah satu jenis Gunung berapi Tipe B (Stratovolcano). Gunung ini sudah beberapa lama tidak beraktivitas vulkanis. Pada tanggal 28 Agustus 2010, mengalami letusan dengan menyebarkan abu dan asap. Material yang dikeluarkan saat letusan gunung berapi adalah belerang, gas SO_2 , partikel debu/aerosol dan sebagainya.



Gambar 1. Profil Gunung Sinabung dan SPAG Bukit Kototabang

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (SPAG) Bukit Kototabang merupakan salah satu stasiun pengamatan referensi udara bersih. Secara geografis SPAG Bukit Kototabang terletak pada 100.32 bujur timur, 0.20 lintang selatan dan pada ketinggian 864.5 meter di atas permukaan laut. Stasiun ini terletak pada lokasi yang jauh dari pemukiman dan aktivitas manusia agar udara yang diukur benar-benar alami sehingga dapat dijadikan referensi udara bersih.

Tulisan ini mencoba mengkaji pengaruh letusan Gunung Sinabung terhadap pengukuran deposisi asam di SPAG Bukit Kototabang.

METODE PENELITIAN

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan agregat harian. Periode data yang dipakai dimulai pada akhir bulan Agustus 2010 sampai pertengahan bulan September 2010. Sedangkan sebagai data pembanding/referensi, yaitu data harian yang tersedia dalam database.

Pengukuran Tingkat Keasaman (pH) dan Daya Hantar Listrik Air hujan (Deposis Basah)

Sampel air hujan yang ditampung pada penakar hujan Observasi (Obs). Sampel hujan ini selanjutnya diukur curah hujannya menggunakan gelas ukur 25 mm standar BMG (untuk corong 100 cm²). Kemudian dilakukan pengukuran tingkat keasaman (pH) dan pengukuran daya hantar listrik sampel air hujan. Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan alat pHmeter inoLab pH Level 1 dengan cara mencelupkan elektroda pH meter ke dalam sampel, nilai pH akan terbaca pada *display* alat. Pengukuran daya hantar listrik menggunakan *Conductivitymeter* Inolab Cond level 1.

Untuk menjaga kualitas data hasil pengukuran, minimal seminggu sekali sebelum pengukuran pH, instrumen dikalibrasi dengan larutan buffer pH 4,0 dan pH 7,0. Instrumen pH meter inoLab pH Level 1 masih berfungsi dengan baik jika *slope* mV/pH berada dalam kisaran range -60,5 sampai -58. Selama proses kalibrasi *slope* mV/pH selalu terbaca dalam range -60,5 sampai -58, dan dari kalibrasi terakhir nilai *slope* mV/pH terbaca -59. Sedangkan untuk menjaga kualitas data pengukuran daya hantar listrik minimal seminggu sekali, *Conductivitymeter* diatur nilai konstanta selnya berada pada kisaran 0,450 sampai 0,500 cm⁻¹, serta harus memenuhi syarat kalibrasi dengan larutan KCl 0,0001 M dan 0,0005 M.

Penggunaan akuades sebagai bahan pelarut dan pencuci alat-alat gelas dikontrol dengan ketat. Untuk menjaga kebersihan dan menghindari kontaminasi dari alat-alat,

akuades yang digunakan merupakan hasil pemrosesan dari alat *Ultra Pure Water System* dengan konduktivitas sampai $0,055 \mu\text{Scm}^{-1}$, sehingga kontaminasi sangat diminimalkan (*Operator's Manual Ultra-Pure Water System Ultra Clear*, 2005).

Pengukuran konsentrasi gas SO₂ dan NO₂ (Deposisi Kering)

Konsentrasi gas SO₂ diperoleh dari instrumen TS43i-Trace Level Enhance. Prinsip kerja instrumen ini dengan metode UV *Fluorescence*. Data gas SO₂ merupakan data dengan resolusi 5 menit, data ini kemudian diolah menjadi agregat harian. Raw data diambil dari instrumen menggunakan *software iport* dengan kabel RS232. Instrumen ini dilengkapi dengan sistem kalibrasi (Dynamic Gas Calibrator TS146i dan Zero Air Supply TS111) serta gas Standar SO₂.

Konsentrasi gas NO₂ diperoleh dari instrumen TS42i-Trace Level. Prinsip kerja instrumen ini *Chemiluminescent*. Data gas NO₂ merupakan data dengan resolusi 5 menit, kemudian diolah data ini kemudian diolah menjadi agregat harian. Rawdata diambil dari instrumen menggunakan *software iport* dengan kabel RS232. Instrumen ini dilengkapi dengan sistem kalibrasi (*Dynamic Gas Calibrator* TS146i dan *Zero Air Supply* TS111) serta gas Standar NO₂.

Konsentrasi gas O₃ (ozon permukaan) diperoleh dari instrumen TEI49C. Prinsip kerja instrumen ini UV *Photometry*. Data O₃ merupakan data dengan resolusi 1 menit kemudian diolah data ini diolah menjadi agregat harian. Raw data diambil dari instrumen menggunakan *software iport* dengan kabel RS232. Instrumen ini dilengkapi dengan sistem kalibrasi (*Calibrator Primary Standard* O₃ TS-49i PS).

Pengukuran konsentrasi aerosol (PM10 dan SPM)

Konsentrasi PM₁₀ (*particulate matter* 10/aerosol berukuran kurang dari 10 μm) diperoleh dari instrumen BAM 1020. Instrumen ini menggunakan prinsip pelemahan sinar beta. Data PM 10 merupakan data dengan resolusi 1 jam. Raw data diambil dari instrumen menggunakan aplikasi hyper terminal dengan kabel RS232. Dari rawdata kemudian diolah menjadi data agregat harian. Konsentrasi SPM (*suspended particulate matter*/aerosol terendap dengan ukuran mencapai 100 μm) diperoleh dari instrumen HVAS (*High Volume Air Sampler*). Instrumen ini dioperasikan selama 24 jam. Selisih antara selisih berat filter sesudah dan sebelum pengoperasian dibagi dengan volume udara yang masuk ke alat merupakan konsentrasi SPM.

Model HYSPLIT VOLCANIC ASH MODEL NOAA

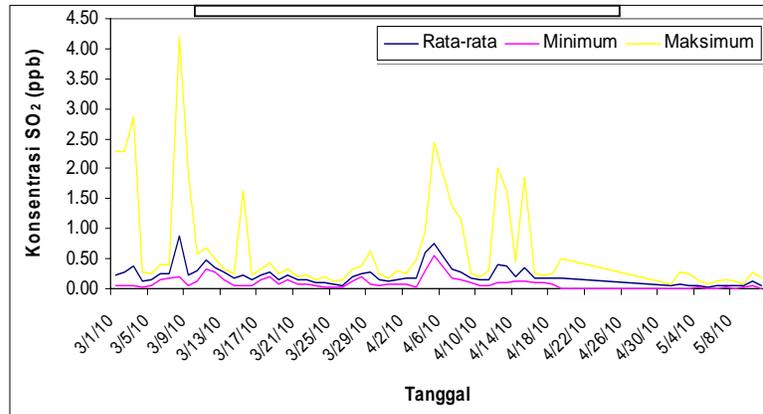
Untuk memperkirakan arah letusan material dan polutan yang keluar dari Letusan Gunung Sinabung digunakan Model HYSPLIT VOLCANIC ASH MODEL dari NOAA.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deposisi Kering

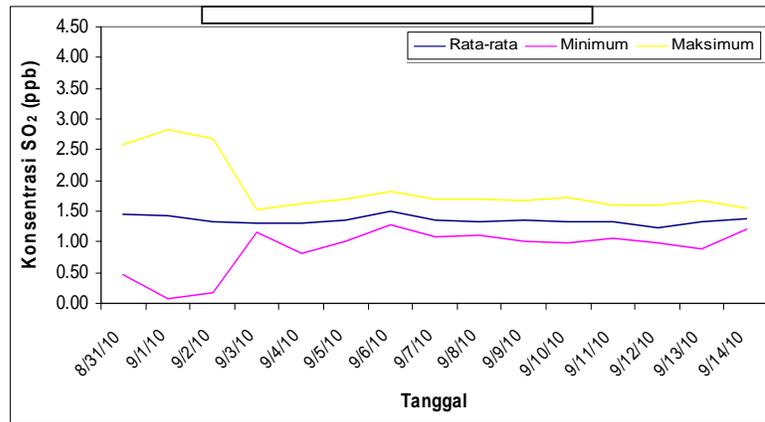
▪ SO₂

Parameter gas yang diamati dalam deposisi kering adalah gas SO₂. Bila kondisi memungkinkan gas ini akan mampu membentuk asam sulfat (H₂SO₄). Walaupun gas ini mempunyai kelarutan yang kecil dalam air, tetapi gas ini dengan jumlah mol yang sama dengan gas lain mampu menaikkan keasaman/ menurunkan pH cukup besar dibandingkan dengan gas lain (CO₂, NO₂). Gambar 2 memperlihatkan konsentrasi SO₂ pada periode 1 Maret – 11 Mei 2010. Konsentrasi SO₂ yang terukur pada periode ini merupakan kondisi tipikal konsentrasi SO₂ sebelum terjadi letusan Gunung Sinabung.



Gambar 2. Konsentrasi SO₂ di Bukit Kototabang sebelum letusan

Sementara itu, konsentrasi SO₂ selama periode letusan Gunung Sinabung diperlihatkan oleh Gambar 3. Gambar tersebut memperlihatkan konsentrasi SO₂ dari tanggal 31 Agustus sampai 14 September 2010.

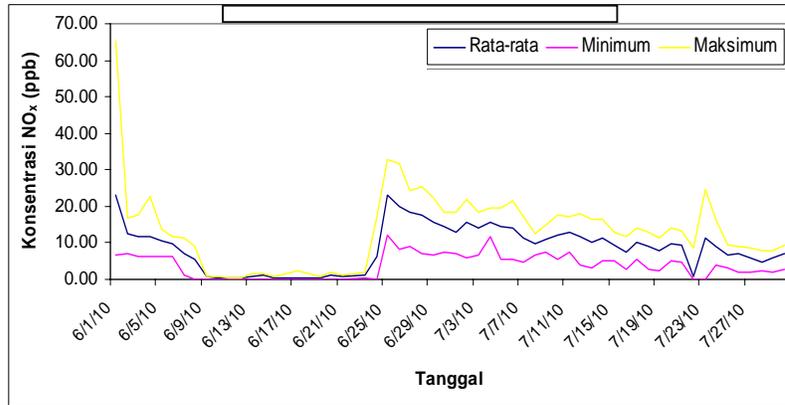


Gambar 3. Konsentrasi SO₂ di Bukit Kototabang setelah letusan

Nilai rata-rata Konsentrasi SO₂ setelah letusan sebesar 1,35 ppb, sedangkan nilai rata rata setelah letusan 0,21 ppb. Meskipun demikian, konsentrasi maksimum SO₂ sebelum letusan mencapai 4,20 ppb. Nilai ini daripada nilai maksimum konsentrasi SO₂ setelah letusan, yang sebesar 2,84 ppb. Dari analisis tersebut dapat dikatakan letusan Gunung Sinabung tidak berpengaruh terhadap pengukuran gas SO₂ di SPAG Bukit Kototabang

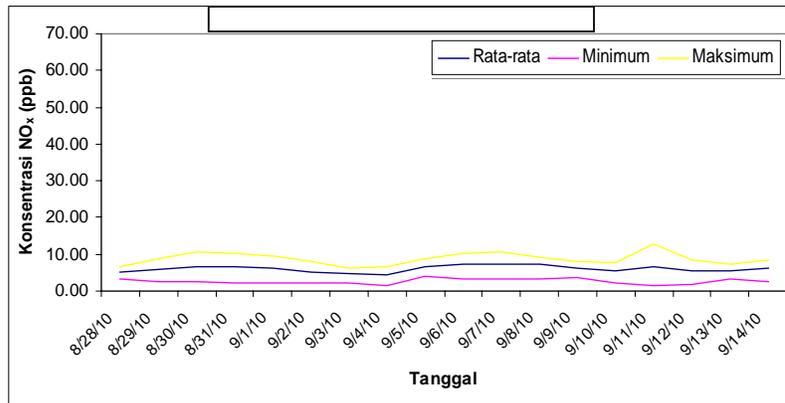
▪ NO_x

Parameter kedua dalam deposisi kering adalah gas NO_x (nitrogen oksida). Gas ini merupakan total NO (Nitrogen Oksida) dan gas NO₂ (Nitrogen Dioksida). Gas NO₂ dalam kondisi lingkungan yang sesuai akan mampu membentuk asam nitrat (HNO₃). Data dari periode 1 Juni sampai 31 Juli 2010 digunakan sebagai data pembandingan sebelum letusan, walaupun ada beberapa hari dimana data tak tersedia. Konsentrasi NO_x sebelum letusan diperlihatkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Konsentrasi NO_x di Bukit Kototabang sebelum letusan

Sementara itu, konsentrasi NO_x selama periode letusan Gunung Sinabung diperlihatkan oleh Gambar 5. Gambar tersebut memperlihatkan konsentrasi SO₂ dari tanggal 28 Agustus sampai 14 September 2010.

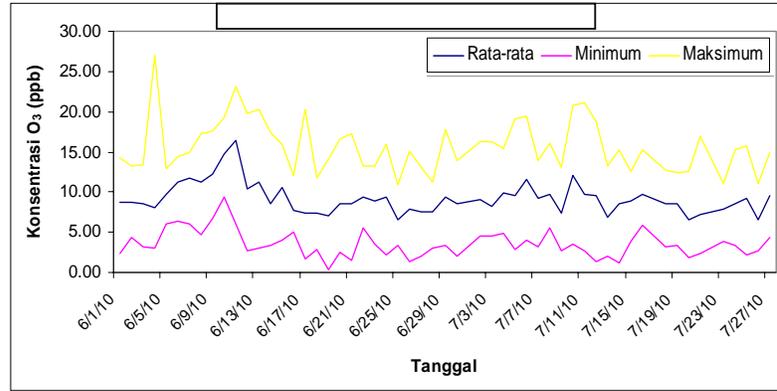


Gambar 5. Konsentrasi NO_x di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap pengukuran gas NO_x di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, terlihat bahwa nilai rata-rata konsentrasi gas NO_x harian setelah Gunung meletus sebesar 6,05 ppb, jauh di bawah nilai rata-rata konsentrasi gas NO_x harian sebelum Gunung meletus sebesar 9,00 ppb.

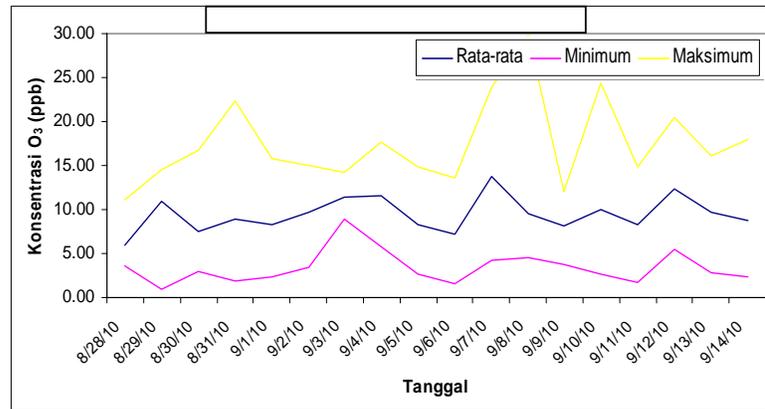
▪ O₃

Parameter ketiga yang dipertimbangkan dalam deposisi kering adalah gas O₃ (ozon permukaan), gas ini penting diamati karena merupakan salah satu polutan yang berfungsi oksidator kuat dan berperanan penting pada reaksi-reaksi kimia di atmosfer. Sebagai data pembandingan (sebelum letusan Gunung Sinabung) digunakan data harian dari 1 Juni 2010 sampai 31 Juli 2010, walaupun ada beberapa hari dimana data tak tersedia, diperoleh data sebagai berikut:



Gambar 6. Konsentrasi O₃ di Bukit Kototabang sebelum letusan

Konsentrasi O₃ selama periode letusan Gunung Sinabung diperlihatkan oleh Gambar 7. Gambar tersebut memperlihatkan konsentrasi SO₂ dari tanggal 28 Agustus sampai 14 September 2010.

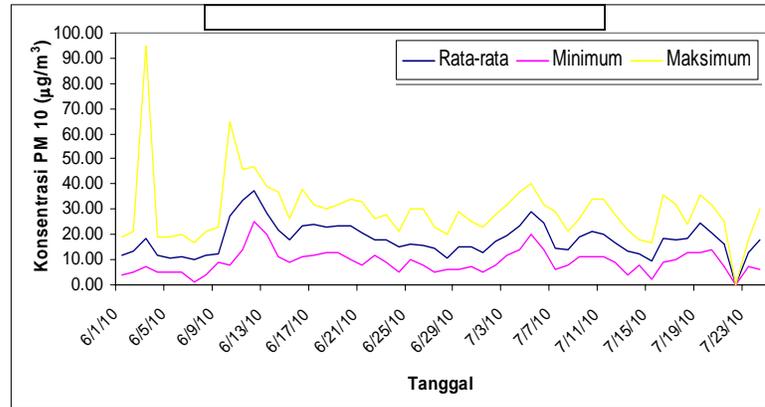


Gambar 7. Konsentrasi O₃ di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap pengukuran gas O₃ di SPAG Bukit Kototabang, terlihat bahwa nilai rata-rata konsentrasi gas harian setelah letusan, sebesar 9,44 ppb, tidak jauh berbeda dengan nilai rata-rata konsentrasi gas harian sebelum letusan, sebesar 9,24 ppb.

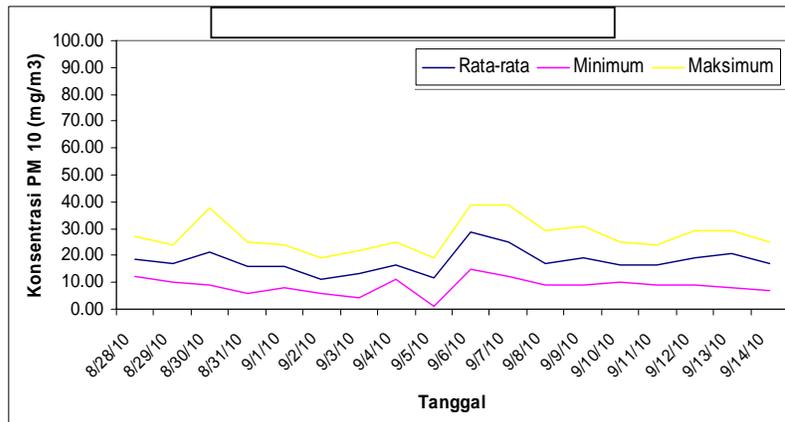
▪ Aerosol (PM₁₀)

Parameter Deposisi kering dari kelompok partikel/aerosol adalah PM 10 (partikel debu berukuran sampai 10 mikron). Parameter ini penting untuk diamati karena aerosol ini berpengaruh terhadap kesehatan manusia terutama pernafasan (berpotensi untuk mengganggu pernafasan) dan dapat mengganggu jarak pandang (visibilitas). Selain itu partikel ini cenderung mempunyai jarak tempuh yang jauh dari sumber awal polutannya. Sebagai data pembandingan (sebelum letusan Gunung Sinabung) digunakan data harian dari 1 Juni 2010 sampai 31 Juli 2010, walaupun ada beberapa hari dimana data tak tersedia, diperoleh data sebagai berikut:



Gambar 8. Konsentrasi PM₁₀ di Bukit Kototabang sebelum letusan

Kadar aerosol PM₁₀ selama periode letusan Gunung Sinabung diperlihatkan oleh Gambar 9. Gambar tersebut memperlihatkan konsentrasi SO₂ dari tanggal 28 Agustus sampai 14 September 2010.

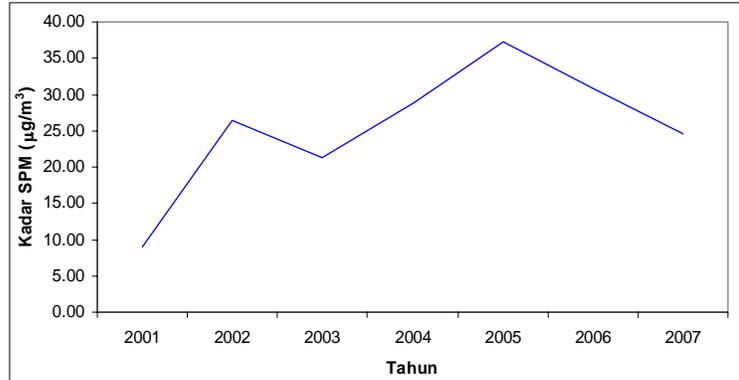


Gambar 9. Konsentrasi PM₁₀ di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap pengukuran aerosol PM 10 di SPAG Bukit Kototabang, terlihat bahwa nilai rata-rata konsentrasi aerosol harian setelah letusan sebesar 17,85 mikrogram/meter kubik, di bawah nilai rata-rata konsentrasi aerosol PM 10 harian sebelum letusan sebesar 18,09 mikrogram/meter kubik.

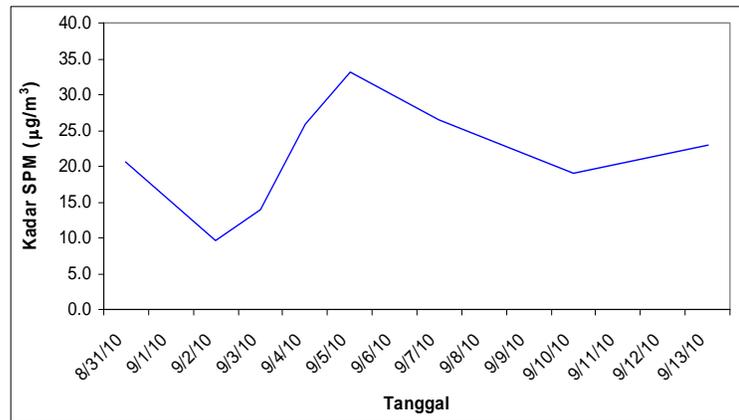
▪ *Aerosol (SPM)*

Parameter kedua deposisi kering dari kelompok partikel/aerosol adalah *SPMSuspended Particulat Matter (SPM)* merupakan partikel debu yang dapat mengendap dan berukuran sampai 100 mikron. Partikel ini diamati karena debu vulkanik cenderung berukuran lebih besar dari 10 mikron. Sebagai data pembandingan (sebelum letusan Gunung Sinabung), digunakan data harian yang telah di agregat menjadi data tahunan, data ini bersumber dari Laboratorium Kualitas Udara BMKG Pusat dari tahun 2001 sampai tahun 2007, diperoleh data sebagai berikut:



Gambar 10. Kadar SPM di Bukit Kototabang periode 2001-2007

Kadar SPM selama periode letusan Gunung Sinabung diperlihatkan oleh Gambar 11. Gambar tersebut memperlihatkan konsentrasi SO₂ dari tanggal 31 Agustus sampai 13 September 2010.



Gambar 11. Kadar SPM di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap pengukuran SPM di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, terlihat bahwa nilai rata-rata konsentrasi aerosol SPM harian setelah Gunung meletus sebesar 21,5 µg/m³, di bawah nilai rata-rata konsentrasi aerosol SPM pembandingan dari tahun 2001 sampai 2007 sebesar 25,45 µg/m³.

Depositi Basah

Air hujan sangat penting pada pengamatan Depositi Basah, karena air hujan berfungsi sebagai pencuci polutan-polutan (*wash out*) yang ada di atmosfer. Sebagai data sampel air hujan (setelah letusan Gunung Sinabung), digunakan data harian dari 28 Agustus 2010 sampai 15 September 2010, walaupun ada beberapa hari dimana tidak terjadi hujan dan curah hujan tidak terukur, sehingga tingkat keasaman (pH) dan konduktivitas/daya hantar listrik air hujan saat itu tidak terukur atau tidak ada, data yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 1. Data Air Hujan Setelah Letusan Gunung Sinabung (data sampel)

Tanggal	Curah Hujan (mm)	DHL (µS/cm)	pH
28/08/2010	10,5	11,2	5,426
30/08/2010	2,3	12,3	5,423
31/08/2010	6,3	9,3	5,323
01/09/2010	44,0	3,9	5,225
02/09/2010	10,5	6,1	5,157
03/09/2010	5,2	8,0	5,913
05/09/2010	6,5	9,1	5,362

Sebagai data pembanding digunakan data harian dari 1 Juli 2010 sampai 27 Agustus 2010, walaupun ada beberapa hari dimana tidak ada hujan dan curah hujan tidak terukur, sehingga tingkat keasaman (pH) dan konduktivitas/daya hantar listrik air hujan tidak terukur. Data yang digunakan sebagai pembanding diperoleh sebagai berikut:

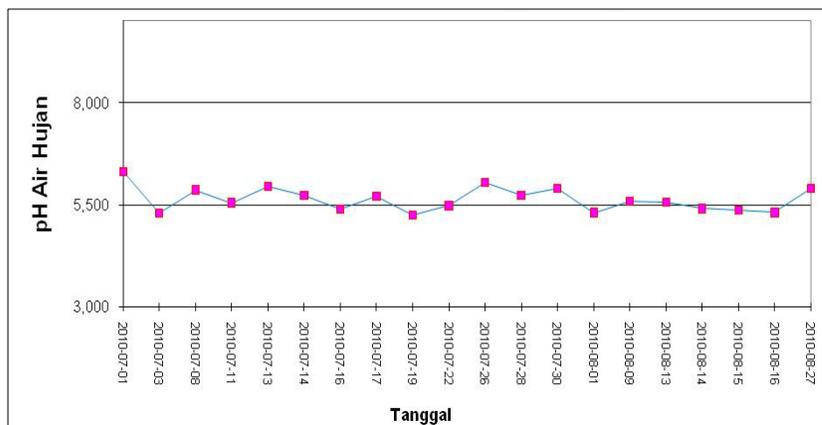
Tabel 2. Data Air Hujan Setelah Letusan Gunung Sinabung (Data pembanding)

Tanggal	Curah Hujan (mm)	DHL ($\mu\text{S/cm}$)	pH
01/07/2010	31,5	4,3	6,306
03/07/2010	8,0	10,5	5,288
08/07/2010	25,5	6,7	5,862
11/07/2010	38,0	7,0	5,548
13/07/2010	48,0	12,0	5,946
14/07/2010	20,0	8,4	5,734
16/07/2010	24,6	3,6	5,400
17/07/2010	1,8	5,4	5,701
19/07/2010	5,3	9,0	5,246
22/07/2010	8,3	11,5	5,480
26/07/2010	3,2	13,7	6,045
28/07/2010	9,8	8,1	5,728
30/07/2010	3,4	6,4	5,900
01/08/2010	2,3	14,8	5,304
09/08/2010	2,3	8,1	5,590
13/08/2010	2,5	23,0	5,558
14/08/2010	48,5	4,2	5,405
15/08/2010	7,4	9,0	5,360
16/08/2010	20,9	3,1	5,309
27/08/2010	5,0	13,3	5,903

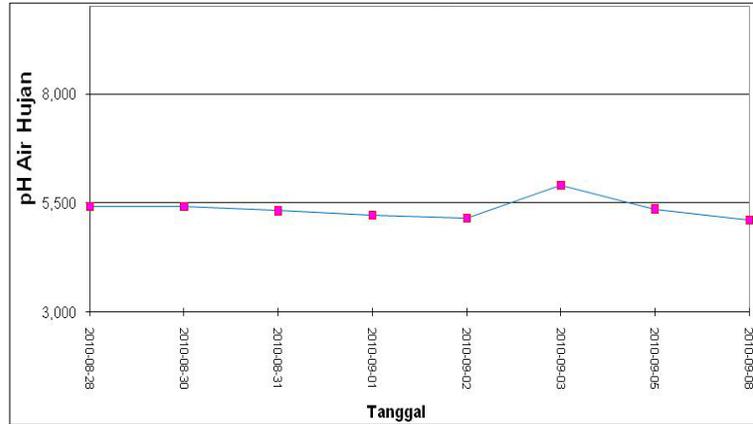
▪ *Tingkat Keasaman (pH) air hujan*

Parameter deposisi basah yang diamati adalah tingkat keasaman (pH). Tingkat keasaman (pH) air hujan sangat penting diamati karena sebagai indikator tingkat kebersihan atmosfer. Bila pH air hujan di sekitar nilai 5,5, berarti air hujan hanya dipengaruhi oleh gas CO₂ saja. Namun bila ada konsentrasi gas terlarut misalnya NO₂ dan SO₂, cenderung akan menurunkan nilai pH atau menaikkan tingkat keasaman. Fenomena dimana air hujan bersifat sangat asam dikenal sebagai hujan asam. Bila hujan asam terjadi dan berlangsung dalam periode yang lama akan berpengaruh buruk terhadap lingkungan hidup (biotik) dan lingkungan tak hidup (abiotik).

SPAG Bukit Kototabang merupakan stasiun referensi udara bersih dan berada pada lokasi remote/jauh dari aktivitas manusia. Tingkat keasaman air hujan selama dua bulan terakhir menunjukkan bahwa air hujan hanya dipengaruhi oleh konsentrasi gas CO₂ saja dibuktikan pH terukur di sekitar nilai 5,5.



Gambar 12. pH air hujan di Bukit Kototabang sebelum letusan

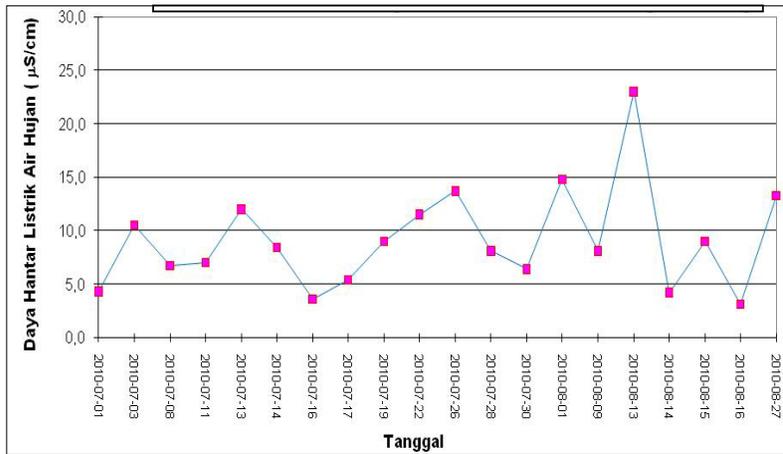


Gambar 13. pH air hujan di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap tingkat keasaman (pH) air hujan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, terlihat bahwa nilai pH air hujan setelah letusan Gunung Sinabung tetap berada di sekitar pH 5,5, artinya tingkat keasaman air hujan hanya dipengaruhi oleh gas CO₂ saja, atau dengan kata lain udara di atmosfer masih bersih.

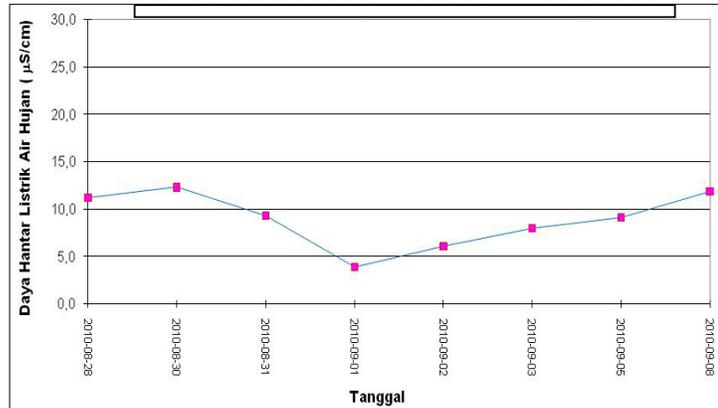
▪ Daya Hantar Listrik (DHL) air hujan

Parameter deposisi basah kedua yang diamati adalah Daya Hantar Listrik (DHL). Daya hantar listrik menggambarkan banyaknya ion-ion yang dapat terlarut dalam air hujan. Semakin tinggi daya hantar listriknya semakin banyak ion-ion terlarut dalam air hujan.



Gambar 14. Daya hantar listrik air hujan di Bukit Kototabang sebelum letusan

SPAG Bukit Kototabang merupakan stasiun referensi udara bersih dan berada pada lokasi remote/jauh dari aktivitas manusia. Daya hantar listrik air hujan menunjukkan konsentrasi polutan di atmosfer. Semakin tinggi konsentrasi polutan di atmosfer yang bisa larut dalam air hujan, maka semakin tinggi daya hantar listrik yang terukur. Dari awal Juli sampai Agustus 2010, daya hantar listrik air hujan berkisar antara 3,1 sampai 23 μS/cm.

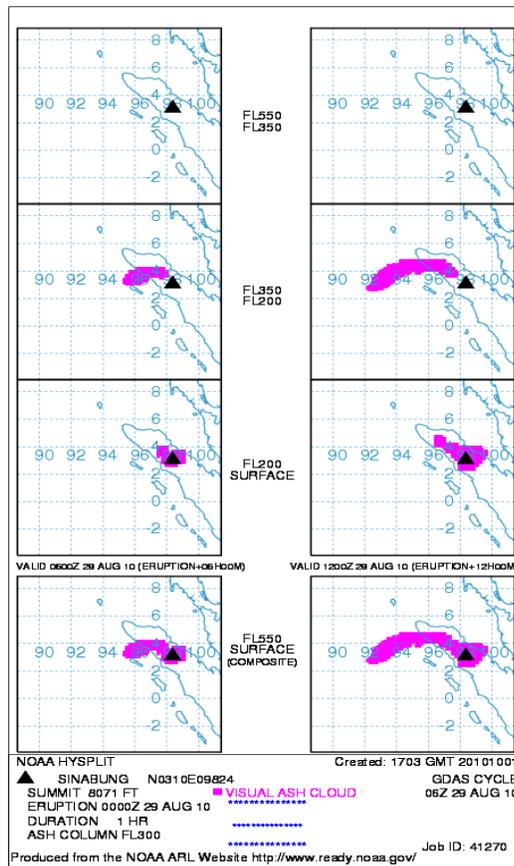


Gambar 15. Daya hantar listrik air hujan di Bukit Kototabang setelah letusan

Letusan Gunung Sinabung ternyata tidak berpengaruh terhadap pengukuran daya hantar listrik air hujan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, terbukti dari nilai daya hantar listrik air hujan setelah letusan Gunung Sinabung berada di dalam kisaran pengukuran daya hantar listrik, atau dengan kata lain udara di atmosfer masih bersih.

HYSPLIT VOLCANIC ASH MODEL

Penggunaan HYSPLIT VOLCANIC ASH MODEL dari NOAA untuk mengkonfirmasi arah material dan polutan (debu vulkanik) yang berasal dari letusan Gunung Sinabung. Arah material letusan dan polutan yang keluar dari Gunung Sinabung cenderung menuju ke arah barat pantai Sumatera, bukan menuju ke Selatan ke arah SPAG Bukit Kototabang.



Gambar 16. HYSPLIT Volcanic Ash Model letusan Gunung Sinabung tanggal 29 Agustus 2010

KESIMPULAN

Berdasarkan data dan analisis di atas dapat diambil kesimpulan, letusan Gunung Sinabung 28 Agustus 2010 tidak mempengaruhi hasil pengukuran Deposisi Asam di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, hal itu karena material letusan berupa partikel (abu) dan gas-gas yang keluar dari Gunung Sinabung tidak sampai di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada dari Pusat Instrumentasi Rekayasa dan Kalibrasi BMKG Jakarta dalam hal ini diwakili oleh Ibu Tuti MHW atas penyediaan data SPM 2001-2007 di SPAG Bukit Kototabang.

DAFTAR ACUAN

Andrews, J. E., P. Brimblecombe, T. D. Jickells, and P. S. Liss. 1996. *An Introduction to Environmental Chemistry*. School of Environmental Sciences. University of East Anglia, Blackwell Sciences, UK.

Anonim. 2010. *Operator's Manual Ultra-Pure Water System Ultra Clear*, SG Wasseraufbereitung und Regenerierstation GmbH, Germany.

Anonim. 2000. *Instruction Manual TEI49C UV Photometric O₃ Analyzer (P/N 9999)*. Thermo Environmental Instruments, Inc., Massachusetts.

Anonim.2001. *BAM 1020 Particulate Monitor Operation Manual*. Met One Instruments, Inc., Oregon.

Anonim.2002. *Operating Manual inoLab pH Level 1*. Weilheim WTW GmbH & Co., Germany.

Anonim.2002. *Operating Manual inoLab Cond Level 1*. Weilheim WTW GmbH & Co., Germany.

Budi, 2003. *Presentasi: Dasar-dasar Pengamatan Hujan*. Stasiun Klimatologi Darmaga, Bogor.

Kurniawan, A. 2009. Pengaruh Gas CO₂ dan SO₂ di Atmosfer terhadap pH Air Hujan Di Bukit Kototabang. *Megasains Vol.2*.

Miroslav R. and B. N. Vladimir. 1999. *Practical Environmental Analysis*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Tahir, I. *Arti Penting Kalibrasi Pada Proses Pengukuran Analitik: Aplikasi Pada Penggunaan pHmeter Dan Spektrofotometer UV-Vis*. Paper Seri Manajemen Laboratorium. Laboratorium Kimia Dasar, Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Gadjah Mada.

STUDI SENSITIFITAS SKEMA LAPISAN BATAS PLANETER DALAM SIMULASI PARAMETER ANGIN (STUDI KASUS WILAYAH PANTAI UTARA PAPUA)

Rully Affandi

Program Studi Meteorologi

Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan Institut Teknologi Bandung

e-mail: arhaz_nab@yahoo.co.id

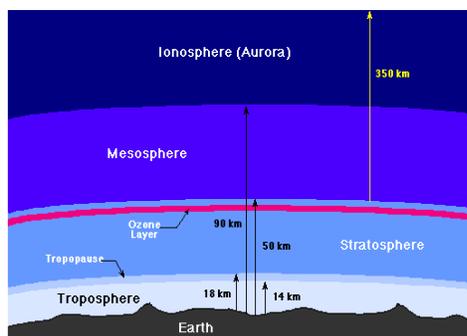
ABSTRACT

Study of Planetary Boundary Layer (PBL) scheme sensitivity on wind parameter simulation has been done. In this study, coastal areas on the northern of Papua, particularly Jayapura (Sentani) and Biak, have been selected as a reference station for model simulation. Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF (WRF-ARW) model was used on this study. The results were then verified to assess whether the model is applicable or not. Results showed PBL 2 scheme (Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme) can be used for area with strong land interaction in the observed area. Meanwhile, PBL Default scheme (Yonsei University scheme) simulated well for groups of small islands such as Biak, where land influence is lesser than that of ocean influence. For wind parameter prediction, it was found that time interval influenced the output. Daily interval was predicted wind parameters than other longer time intervals. PBL scheme can also be used as the reference for upper air data, besides using radiosonde for up to 700 mb level on YSU scheme and 500 mb – 100 mb on MYJ scheme. It was also found that trade wind affected precipitation pattern on the observed area, as a result of air mass supply from Pacific Ocean.

Keywords: PBL, northern Papua, WRF-ARW, YSU, MYJ.

PENDAHULUAN

Pantai utara Papua merupakan suatu kawasan, sedangkan di sebelah timur wilayah Papua yang memiliki hubungan interaksi secara langsung terhadap kawasan Samudera Pasifik bagian barat daya dan juga deretan pegunungan tengah Jayawijaya dengan salah satu puncaknya tertinggi di Indonesia memberikan nuansa topografi Papua. Selain itu pengaruh regional berupa angin pasat di sekitar ekuator Samudera Pasifik, adanya Sirkulasi Walker memberikan implikasi sirkulasi massa udara dari di kawasan samudera Pasifik dan kawasan sekitarnya termasuk Papua. Fenomena regional maupun global ataupun lokal juga mempengaruhi fenomena cuaca yang terjadi seperti misalnya Madden Julian Oscillation (MJO), monsoon Asia dan Australia, El Nino, La Nina. Dari latar belakang baik itu topografi dan juga pengaruh interaksi sirkulasi dan samudera itu sendiri berupa adanya anomali suhu muka laut yang signifikan memberikan pengaruh terhadap dinamika pertumbuhan awan-awan hujan konvektif terutama di sekitar pantai utara Papua.

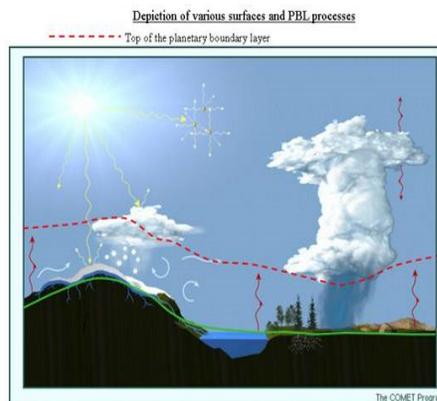


Gambar 1. Lapisan Atmosfer

Atmosfer merupakan lapisan gas/udara yang menyelubungi /melingkupi sebuah planet dalam hal ini termasuk planet kita, bumi, dari permukaan sampai jauh di luar angkasa. di bumi, atmosfer terdapat dari mulai dari permukaan di atas permukaan tanah, sampai dengan sekitar 560 km yang tersusun dari beberapa lapisan, yang dinamai menurut fenomena yang terjadi di lapisan tersebut.

Berbagai model meteorologi telah banyak tersebar baik itu di dapat secara gratis maupun melalui berbagai macam kerjasama dalam pengembangannya. Salah satu model yang dikembangkan yaitu WRF V.3. Di sini, WRF memiliki parameterisasi-parameterisasi yang difungsikan agar suatu model meteorologi mampu memberikan output yang baik terhadap karakteristik suatu wilayah.

Salah satu parameterisasi yang dimiliki adalah parameterisasi planetary boundary layer (PBL) atau lapisan batas planeter, merupakan suatu proses parameterisasi dalam pengemulian model Planetary Boundary Layer dimana sebagai lapisan atmosfer dekat permukaan bumi dari permukaan hingga beberapa KM ($\pm 1-3$ KM) yang merupakan bagian dari atmosfer yang mempengaruhi kondisi permukaan bumi secara langsung dan memberikan reaksi terhadap gaya permukaan dengan skala waktu satu jam ataupun lebih sedikit. Lapisan PBL pada setiap tempat dan waktu memiliki ketebalan yang berbeda-beda (Stull, 1988). Interaksi antara atmosfer pada batasan PBL terhadap permukaan menimbulkan pengaruh terhadap pola pergerakan angin dimana pada lingkup PBL terjadinya gaya gesek permukaan. Selain itu pengaruh permukaan lainnya seperti evaporasi & transpirasi, perpindahan panas, emisi polutan dll.

**Gambar 2.** Deskripsi Proses pada lapisan batas Planeter

Sejumlah komponen fisis seperti kecepatan angin, temperatur, kelembaban dsb, menunjukkan fluktuasi yang berubah dengan cepat, dan dengan kondisi pencampuran vertikal yang kuat. Pada Permukaan bumi terjadi pertukaran panas dan uap air yang yang merupakan awal mula sebagai penggerak terjadinya iklim dan sistem cuaca di bumi akibat adanya radiasi matahari sebagai sumber energi.

Kemudian ada pertanyaan, “Mengapa perlu dilakukan parameterisasi skema PBL?”

1. Pada Permukaan bumi terjadi pertukaran panas dan uap air yang yang merupakan awal mula sebagai penggerak terjadinya iklim dan sistem cuaca di bumi akibat adanya radiasi matahari sebagai sumber energi.
2. Banyak terjadinya fenomena cuaca dan iklim digerakkan oleh adanya interaksi atmosfer dan permukaan bumi, sehingga proses-proses di permukaan dan di lapisan batas harus diidentifikasi dan dipahami agar dapat mensimulasikan model prediksi dengan baik.
3. Proses-proses ini sering diabaikan bahkan tidak digunakan pada model. Akurasi prediksi disini sangat diperlukan untuk mendukung informasi –informasi berkaitan dengan hurricane, monsun, dsb.
4. Selain itu kita dapat mengetahui tentang mekanisme fisis dasar dari proses-proses yang terjadi di lapisan batas, termasuk di dalamnya gerak turbulen dan non turbulen, transpor energi radiatif, termodinamika, perubahan fasa air, fisiologi

tumbuhan, reflektansi bahan, kimia, hukum-hukum konservasi massa, energi, dan momentum.

5. Adanya Observasi yang dilakukan untuk analisis dan mensimulasikan mekanisme fisis dasar dari lapisan batas melalui sebuah model yang dikembangkan sehingga dapat memberikan suatu nilai yang rasional dari hasil observasi. Sebagai pemisalan kita dapat menggambarkan bagaimana pertukaran maupun pelepasan dari adanya pengangkatan suatu parcel udara yang digerakkan oleh termal dan adanya pencampuran turbulen dalam parcel yang disebabkan oleh angin berkecepatan tinggi di atas permukaan yang kasar.

Di sini dapat diterangkan secara singkat beberapa skema yang dipergunakan dalam simulasi, yaitu :

Skema Yonsei University (YSU)

Merupakan generasi MRF-PBL yang merupakan modifikasi dari skema MRF. Skema non local-K dengan lapisan entrainment eksplisit dan profil parabolik K pada lapisan campuran yang tidak stabil (Skamarock et al. 2005). Modifikasi yang dilakukan untuk mengurangi pencampuran (mixing) non-lokal K dan dengan memasukkan entrainment eksplisit fluks panas, kelembaban dan momentum, transport momentum counter-gradient, perbedaan spesifikasi dari PBL height, dan Profil K parabolik dalam lapisan pencampuran yang tidak stabil (Hong and Dudhia 2003).

Skema ini telah di uji untuk WRF-NMM). Skema YSU memberikan gambaran mengenai simulasi 2 sensitivitas yang berbeda kombinasi dari skema meteorologi yang digunakan. Skema YSU bergantung pada bilangan Bulk Richardson.

Skema Mellor-Yamada-Janjic TKE (MYJ)

Skema prognostik kinetik turbulen satu dimensi dengan campuran vertikal skala lokal. (Janjic 1990, 1996a, 2002). (Skema ini telah dites untuk WRF-NMM, pada NCEP). Skema MYJ prosedur yang dimilikinya bertujuan mensinergikan viskositas pada pada lapisan pertengahan dan permukaan (Janji'c 1994), di saat kedua skema MRF and YSU menghitung formulasi logaritmik persamaan fluks dasar. Terdapat perbedaan solusi iterasi antara pendekatan iterasi dari WRF untuk koefisien kekasaran permukaan (untuk kondisi adanya konvektifitas). Solusi iterasi tersebut mempergunakan algoritma Newton–Raphson algorithm, dimana dengan cepat dapat menyatukandan menyediakan sedikit iterasi awal dengan nilai dari langkah waktu sebelumnya.

Skema ACM2(Pleim) PBL (ARW)

Parameterisasi boundary layer ACM2 sangat penting karena merupakan skema yang canggih. ACM2 merupakan skema Land Surface Model Pleim-Xiu. Fungsinya adalah untuk mempertahankan konsistensi mixing turbulen. ACM2 merupakan kombinasi dari teknik closure lokal dan non-lokal untuk menghitung baik turbulensi yang digerakkan dengan shear skala kecil maupun turbulensi skala besar.

ACM2 merupakan pengembangan dari skema ACM ditambahkan dengan skema Eddy. Skema difusi Eddy mengasumsikan bahwa semua turbulensi terjadi pada subgrid dan secara relistis tidak dapat mensimulasikan kondisi konvektif. Versi terbaru ACM (ACM2) memasukkan skema non-lokal dari ACM original yang dikombinasikan dengan skema difusi Eddy.

Dengan demikian, ACM2 mampu mewakili baik komponen skala super-grid maupun sub-grid dari transport turbulens di CBL. Walaupun tampilan ACM2 untuk temperature potensial sama dengan skema difusi Eddy dengan syarat gradient penyesuaian (seperti YSU dan MRF), skema ACM2 secara khas dapat digunakan untuk beberapa parameter atmosfer seperti kelembaban, micrometer, momentum, dll.

Karakteristik ACM2 :

- Skema non-lokal tertutup
- Model *Transilient* sederhana untuk PBL yang tidak stabil, difusi Eddy untuk PBL yang stabil.
- Mengikutsertakan *local mixing* untuk semua level

- Mendorong untuk menghasilkan profil yang lebih kontinu pada lapisan yang lebih rendah.
- *Smooth and gradual transition* dari kondisi stabil ke kondisi tidak stabil.
- Profil yang dihasilkan lebih realistis pada level rendah (low)

Skema ACM2 dapat mewakili baik komponen skala supergrid maupun subgrid dari transport turbulensi dalam Convective Boundary Layer (CBL).

Tulisan ini bertujuan membuat simulasi dengan model WRF menggunakan tiga skema PBL yang berbeda, yaitu skema Yonsei University (YSU), skema Mellor-Yamada-Janjic TKE dan skema ACM2(Pleim) PBL (ARW) melalui studi parameter angin. Serta mengetahui skema yang paling baik dalam menggambarkan variasi kondisi atmosfer dengan acuan data sounding dari keluaran tiap skema terhadap data observasi dalam hal ini parameter komponen angin zonal dan meridional.

METODE PENELITIAN

Simulasi skema PBL menggunakan parameter angin komponen u (zonal) dan v (meridional) menggunakan model cuaca numerik skala meso WRF-ARW (Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF) selanjutnya dilakukan downscaling. Wilayah simulasi disekitar wilayah Pantai Utara Papua dengan resolusi spasial 9 km dan resolusi temporal 180 detik. Data hasil simulasi diekstrak tiap tiga jam.

Pengaturan skema parameterisasi perlu dilakukan agar model dapat meng-emulasi-kan proses-proses dalam skala sub-grid dengan baik. Parameterisasi mikrofisika awan-hujan menggunakan skema WSM-5 (WRF Single-Moment 5-Class), skema ini cocok untuk simulasi dengan resolusi tinggi (Hong et.al,2006). Parameterisasi konvektif menggunakan skema Arakawa Schubert. Skema-skema ini dipilih dikarenakan telah dilakukan pengujian dan dipandang cukup baik untuk wilayah Pantai Utara Papua. Running model dilakukan pada tanggal studi kajian 1 hingga 3 Maret 2010. Sedangkan Parameterisasi PBL menggunakan A4B4/skema default/Skema Yonsei University (YSU), skema Mellor-Yamada-Janjic TKE (PBL 2) dan skema ACM2(Pleim) PBL (ARW) (PBL 7).

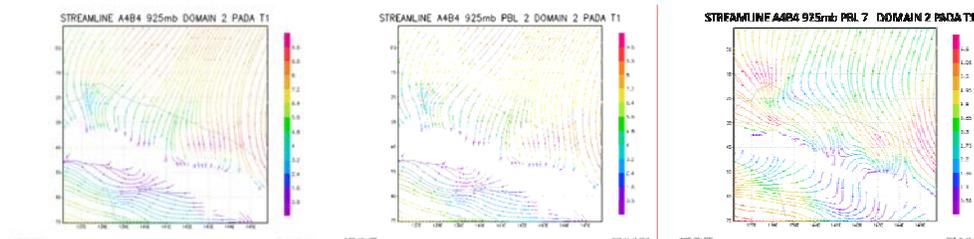
Adapun persamaan yang dipergunakan untuk mencari parameter angin zonal (u) dan meridional(v) dengan menggunakan persamaan :

$$u = ff \times \cos[(270 - ddd)] \times \frac{\pi}{180} \tag{1}$$

$$v = ff \times \cos[(270 - ddd)] \times \frac{\pi}{180} \tag{2}$$

Hasil output model diverifikasi pada titik stasiun pengamatan Jayapura (Sentani dan Genyem) dan Biak pada tanggal yang sama yaitu data pengamatan permukaan dan pengamatan udara atas tanggal 1 -3 Maret 2010. Jayapura untuk data angin permukaan dan Biak untuk komponen data udara atas. Selanjutnya dilakukan verifikasi dengan metoda statistika dan khusus komponen vertical angin dilakukan analisa lapisan permukaan hingga 850mb dan lapisan atas 700mb-100mb.

HASIL DAN PEMBAHASAN

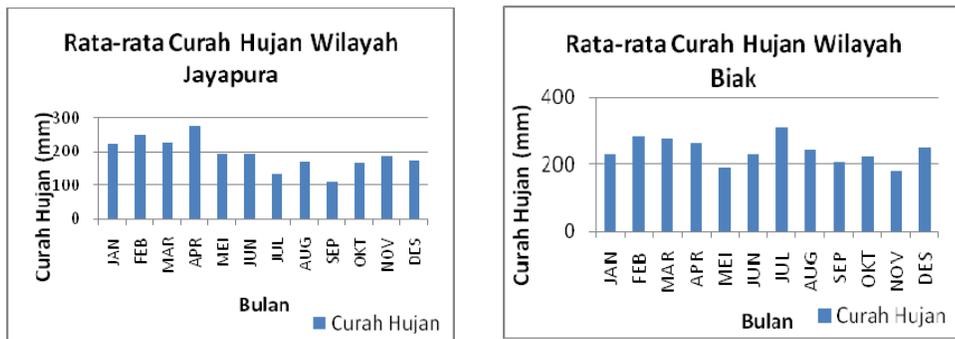


Gambar 4. Streamline angin model WRF paras 925 mb

Dari hasil keluaran angin pada paras 925 mb menunjukkan bahwa dominasi angin yang menuju darat cukup kuat. Dari running keluaran model yang dilakukan tanggal 1 hingga 3 Maret 2010 memperlihatkan bahwa dominasi juga oleh angin yang menuju ke darat hingga ke pegunungan tengah. Angin umumnya bertiup dari barat laut-Utara.

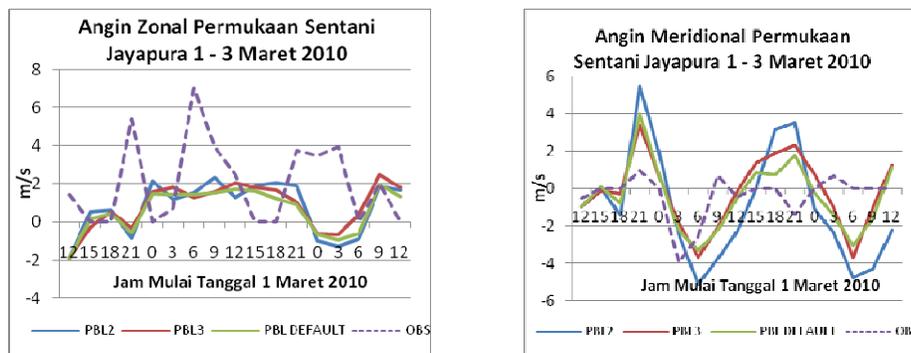
Dari gambaran di atas, dapat dianalisa bahwa pada angin paras atas, pengaruh angin pasat dari Pasifik cukup kuat dan pada wilayah Pantai Utara Papua menuju ke daratan. Interaksi angin darat dan laut pada wilayah ini cenderung dikalahkan dengan kuatnya dominasi pasat.

Dari analisa di atas, suplai massa udara cenderung didominasi dari Samudra Pasifik yang hangat dan transfer massa udara tersebut oleh angin pasat yang mendominasi pada wilayah Samudera Pasifik tersebut memberikan pengaruh yang besar pada pembentukan pola curah hujan di kawasan Pantai Utara Papua hingga ke wilayah pegunungan Tengah.



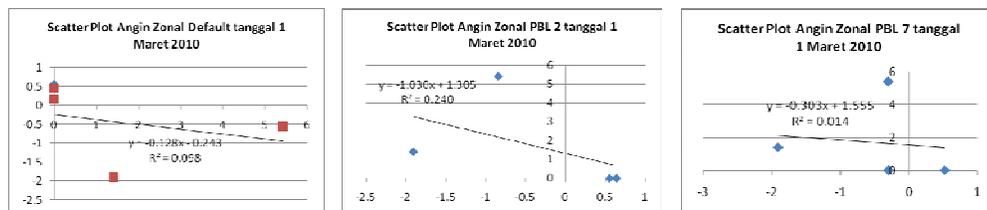
Gambar 5. Grafik rata-rata pola curah hujan di Jayapura dan Biak

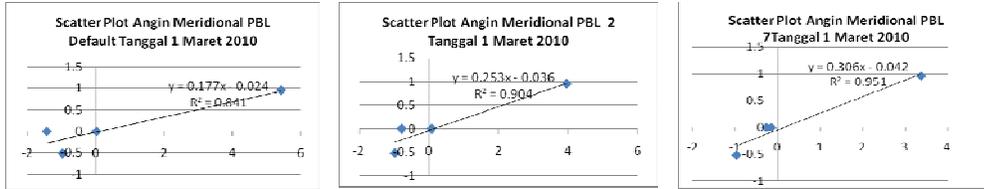
Dari gambar grafik di atas, pengaruh angin dan suplai massa udara yang besar dimana kemudian sebagai materi pembentukan awan-awan hujan di wilayah Pantai Utara Papua dibuktikan rata-rata pola curah hujan bulanan yang di atas 100 mm.



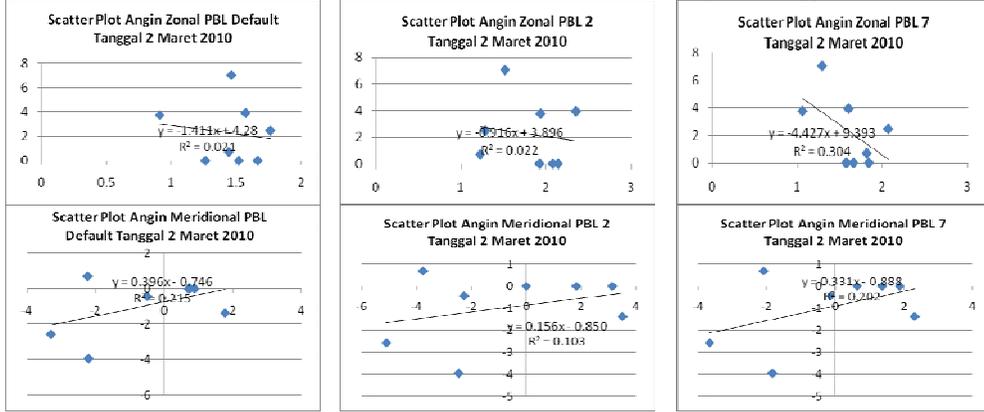
Gambar 6. Grafik angin Zonal dan Meridional Permukaan di Sentani Jayapura.

Verifikasi Model

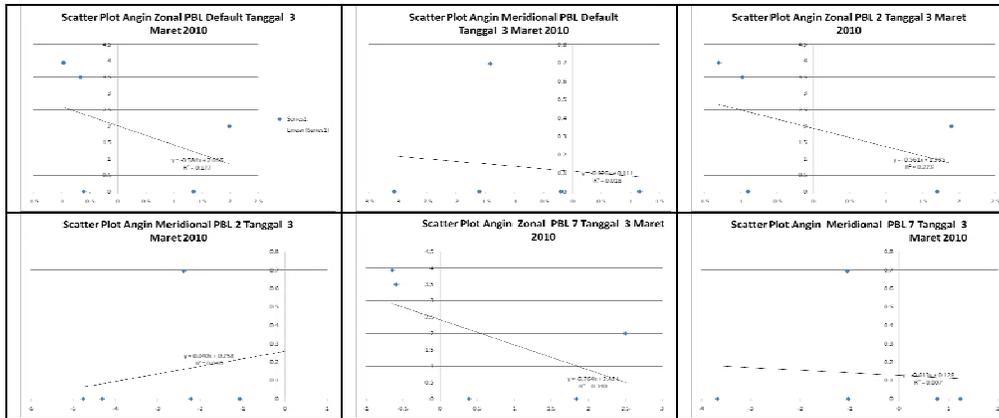




Gambar 7. Scatter plot angin zonal dan meridional permukaan di Sentani Jayapura tanggal 1 Maret 2010



Gambar 8. Scatter plot angin zonal dan meridional permukaan di Sentani Jayapura tanggal 2 Maret 2010



Gambar 9. Scatter plot angin zonal dan meridional permukaan di Sentani Jayapura tanggal 3 Maret 2010

Tabel 1. Perhitungan terhadap observasi permukaan Sentani 1 Maret 2010 s/d 21.00 UTC

Analisa Statistik	A4B4		PBL 2		PBL 7	
	U	V	U	V	U	V
SD	2.15177	1.58011	2.1684	2.13821	2.15431	1.35374
Korelasi	0.31305	0.95079	0.4899	0.91706	0.11832	0.97519
RMSE	3.42418	1.5705	3.56648	2.35482	3.31963	1.5705
R ²	0.098	0.904	0.24	0.841	0.014	0.951

Tabel 2. Perhitungan terhadap observasi permukaan Sentani 2 Maret 2010 s/d 21.00 UTC

Analisa Statistik	A4B4		PBL 2		PBL 7	
	U	V	U	V	U	V
SD	1.80342	1.67501	1.78398	2.46498	1.78987	1.85663
Korelasi	0.14491	0.46368	0.14832	0.32094	0.55136	0.44944
RMSE	2.56561	1.72753	2.51706	2.92757	2.64314	2.02514
R ²	0.021	0.215	0.022	0.103	0.304	0.202

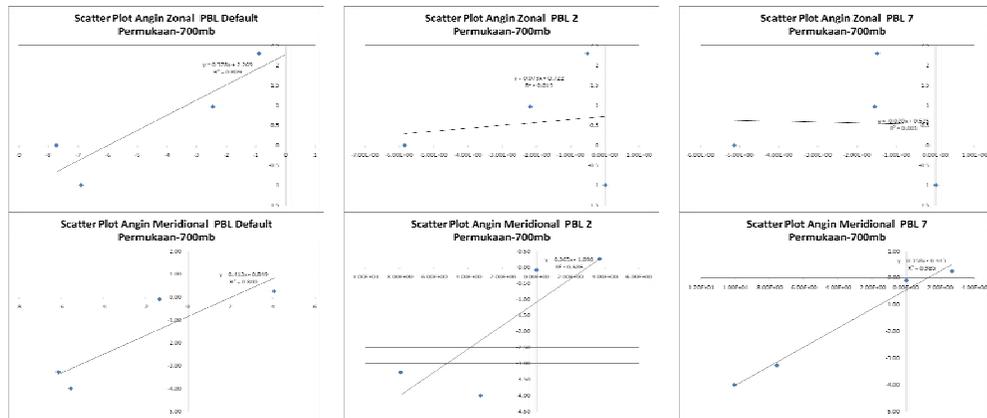
Tabel 3. Perhitungan terhadap observasi permukaan Sentani 3 Maret 2010 s/d 21.00 UTC

Analisa Statistik	A4B4	PBL 2	PBL 7
-------------------	------	-------	-------

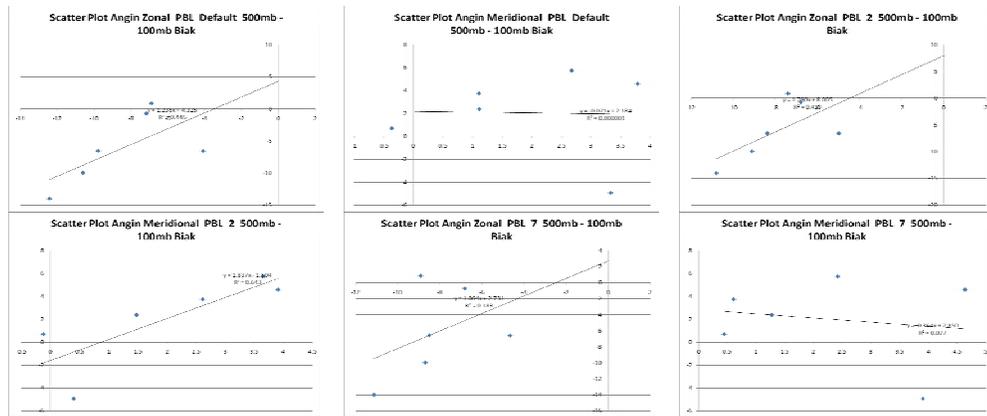
	U	V	U	V	U	V
SD	1.76832	1.23752	1.88438	1.9351	1.68655	1.38927
Korelasi	0.42071	0.13416	0.47223	0.2	0.5831	0.08367
RMSE	2.95146	1.88096	3.19944	3.36721	2.88264	1.98771
R ²	0.177	0.018	0.223	0.04	0.34	0.007

Hasil perhitungan statistik, scatter plot dari ketiga skema terhadap observasi permukaan terlihat dari ketiga skema perhitungan Standar Deviasi, Korelasi, Koefisien Regresi dan RMSE nilai yang di dapat menunjukkan nilai yang lebih baik dari ke-3 skema PBL pada tanggal 1 Maret korelasinya cukup bagus adalah pada Skema PBL 2 (skema Mellor-Yamada-Janjic TKE) dengan Standar Deviasi angin zonal 2.1684 dan angin meridional 2.13821, Korelasi angin zonal 0.4899 dan angin meridional 0.91706, RMSE angin zonal 3.56648 dan angin meridional 2.35482 serta Koefisien Regresi angin zonal 0.24 dan angin meridional 0.841.

Akan tetapi hasil yang kurang baik ditunjukkan pada prediksi tanggal 2 Maret dan 3 Maret 2010. Pada verifikasi untuk angin paras vertikal (udara atas) pada wilayah Biak dilakukan pembagian batas verifikasi yaitu lapisan permukaan hingga 700mb dan 500 hingga 100mb.



Gambar 10. Scatter plot angin zonal dan meridional pada permukaan – 700 mb model WRF terhadap observasi udara atas Biak tanggal 3 Maret 2010 pukul 12.00 UTC



Gambar 11. Scatter plot angin zonal dan meridional pada 500 mb – 100 mb model WRF terhadap observasi udara atas Biak tanggal 3 Maret 2010 pukul 12.00 UTC

Tabel 4. Perhitungan terhadap observasi temperatur udara Biak permukaan – 850 mb tanggal 3 Maret 2010 12.00 UTC

Analisa Statistik	PBL Default		PBL 2		PBL 7	
	U	V	U	V	U	V
SD	3.59585	3.40393	2.43485	3.52518	2.19945	4.32201
Korelasi	0.89944	0.89443	0.13784	0.82825	0.03162	0.99247

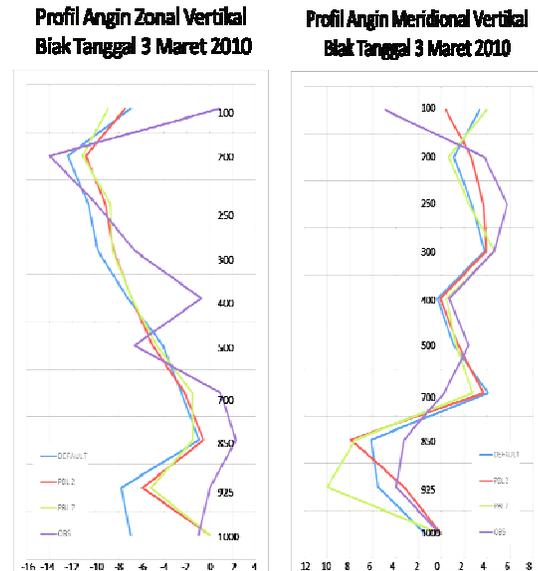
RMSE	5.39762	2.57807	3.64218	2.90476	3.46713	3.88095
R ²	0.809	0.8	0.019	0.686	0.001	0.985

Tabel 5. Perhitungan terhadap observasi temperatur udara Biak 500 mb – 100 mb tanggal 3 Maret 2010 12.00 UTC

Analisa Statistik	PBL Default		PBL 2		PBL 7	
	U	V	U	V	U	V
SD	4.44319	2.79857	4.0975	2.82261	4.16482	2.84446
Korelasi	0.66708	0.001	0.64265	0.80187	0.42778	0.16432
RMSE	4.49676	3.8293	4.51278	2.45217	5.00506	4.08744
R ²	0.445	0.000001	0.413	0.643	0.183	0.027

Hasil perhitungan statistik, scatter plot dari ketiga skema terhadap observasi udara atas terlihat dari ketiga skema, pada lapisan permukaan hingga 700mb menunjukkan hubungan yang sangat kuat dari perhitungan Standar Deviasi angin zonal 3.59585 dan angin meridional 3.40393, Korelasi angin zonal 0.89944 dan angin meridional 0.89443, RMSE angin zonal 5.39762 dan angin meridional 2.57807 serta Koefisien Regresi angin zonal 0.809 dan angin meridional 0.8 pada Skema PBL Default (Skema Yonsei University (YSU)).

Sedangkan hasil perhitungan statistik, scatter plot dari ketiga skema terhadap observasi udara atas terlihat dari ketiga skema, pada lapisan 500mb hingga 100mb tidak menunjukkan hubungan yang kuat pada Skema PBL Default (Skema Yonsei University (YSU)). Tetapi cukup kuat pada skema yang lain yaitu Mellor Yamada Janjic (MYJ) menunjukkan hasil yang cukup kuat dari perhitungan Standar Deviasi angin zonal 4.0975 dan angin meridional 2.82261, Korelasi angin zonal 0.64265 dan angin meridional 0.80187, RMSE angin zonal 4.51278 dan angin meridional 2.45217 serta Koefisien Regresi angin zonal 0.413 dan angin meridional 0.643.



Gambar 11. Keluaran angin zonal dan meridional vertical per lapisan WRF terhadap observasi udara atas Biak tanggal 3 Maret 2010

Dari grafik pada model terlihat bahwa dominasi angin zonal negatif cenderung kuat yang menandakan angin timuran kuat dan didukukung oleh keluaran amngin meridional

hingga paras 700mb negatif yang menandakan pada paras tersebut dominasi angin dari utara cukup kuat. Nilai minus pada angin zonal rata-rata hingga 100mb menunjukkan angin dominan dari timur. Sehingga terlihat pada kondisi tanggal kajian angin pasat cukup kuat yaitu bertiup dari timur (Easterly) hingga paras 700mb. Pada data observasi variabilitas angin terlihat nilai rata-ratanya hingga 100 mb menunjukkan nilai minus yang menunjukkan pengaruh easterly cukup signifikan walaupun adanya arah dari barat pada level-level tertentu akan tetapi tetap di dominasi angin timuran.

Dari paras 700mb hingga 200mb angin meridional menunjukkan nilai positif yang menandakan angin dari selatan komponen meridional cukup kuat sehingga kombinasi antara zonal dan meridional menunjukkan angin pada paras tersebut dominan dari timur hingga selatan.

KESIMPULAN

Verifikasi model WRF pada parameterisasi lapisan Batas Planeter pada wilayah pantai Utara Papua menunjukkan untuk skema PBL 2 (skema Mellor-Yamada-Janjic TKE) dapat dipergunakan pada wilayah dengan interaksi daratan yang cukup besar di wilayah Pantai Utara Papua dan skema PBL Default (Skema Yonsei University (YSU)) dapat dipergunakan pada wilayah dengan gugusan kepulauan atau pulau kecil seperti Biak dimana pengaruh daratan cukup kecil dibandingkan pengaruh lautan/samudera yang sangat besar.

Untuk prediksi pada parameter angin atau data permukaan pada interval waktu prediksi 1 harian menghasilkan keluaran yang cukup baik akan tetapi pada interval waktu lebih lama hasilnya kurang memuaskan atau belum bisa mewakili secara baik hasil prediksi.

Pada penggunaan skema PBL untuk angin vertical, model bisa dipergunakan sebagai acuan data udara atas selain menggunakan Radiosonde. Selain itu pada kajian ini juga didapat bahwa pengaruh angin pasat cukup besar di wilayah Pantai Utara Papua yang memberikan implikasi terhadap pola curah hujan di wilayah tersebut dengan pasokan massa udara yang besar dari Samudera Pasifik.

DAFTAR PUSTAKA

Mariusz Pagowski, 1988: *Some Comments On Pbl Parameterizations In WRF*.

Joseph B. Olson ! and John M. Brown 2006 :*Comparison of two mellor-yamada-based pbl schemes in Simulating a hybrid barrier jet*.

Prawirowardoyo,S., 1996: *Meteorologi*, Penerbit ITB, Bandung.

http://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_boundary_layer

http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/5-7_Gilliam.pdf

<http://www.met.tamu.edu/class/metr452/models/2001/PBLproject.html>

<http://kadarsah.wordpress.com/2009/08/31/metode-verifikasi-prediksi/>

EFEK ANGIN TERHADAP KONSENTRASI POLUTAN TERUKUR KARBON MONOKSIDA DI BUKIT KOTOTABANG (STUDI KASUS TANGGAL 7 – 24 FEBRUARI 2010)

Asep Firman Ilahi

Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang

e-mail: aspfi@yahoo.com

ABSTRACT

Wildfires have emerged as a huge environmental problem in Sumatra due to several air pollutants injected to the atmosphere. High concentration of air pollutant measured at Bukit Kototabang indicated there has been a long range transport of air mass. Hence, health issues become great concern in the affected area. Wind plays significant role on transporting pollutants. Correlation and influence of the wind to pollutant transport has been tested, together with meteorological parameters that help the process. Further study by using linear-linear and circular-linear correlation methods gave illustration on how angular data can be used for analyzing environmental problem. Sine component for 850 mb level of wind has given a positive value, indicating increasing trend of carbon monoxide level. Meanwhile, the increasing of carbon monoxide level is related to the decreasing of other variables. Variation of carbon monoxide level is also affected by wind speed, air temperature, and humidity. All of these variables have opposite correlation to carbon monoxide level.

Keywords: *Air pollutant, long range transport, carbon monoxide, Bukit Kototabang*

PENDAHULUAN

Sejumlah studi epidemiologi telah melaporkan bahwa fluktuasi kematian harian dan musiman secara positif dan signifikan berkaitan erat dengan polusi atmosfer dan variabel meteorologi seperti suhu dan tekanan udara, walaupun sedikit banyak diketahui resiko kesehatan akibat dari polusi dalam konteks variasi bentuk cuaca (Rainham *et al.*) Sekilas, kalkulasi statistik parameter angin seperti rata-rata arah angin (U) dan standar deviasi arah angin horizontal (σ_θ), kelihatan hampir sepele, akan tetapi inspeksi lebih mendalam hal ini menjadi jelas bahwa topik ini menjadi sangat problematik. Bagian dari permasalahan ini adalah teknik linear yang digunakan pada data sirkular (Arnold, S.L.).

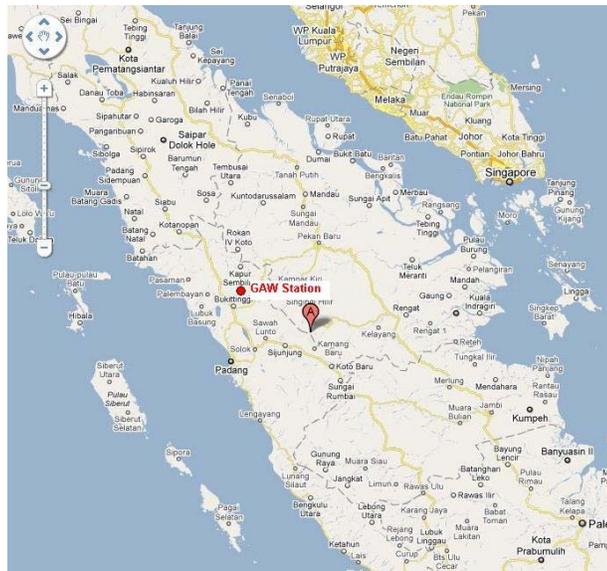
Angin permukaan tidak seperti halnya parameter cuaca lain yang mempunyai besaran linear, dalam praktek analisis secara statistik harus menjadi sesuatu yang harus diperhatikan. Karena arah angin (wind direction) merupakan variabel 2 dimensi (*circular variable*) yang dipresentasikan sebagai suatu titik didalam keliling suatu lingkaran (Jammalamadaka, 1998). Data sirkular adalah kelas besar dari data arah angin, yang mana banyak digunakan dalam bidang termasuk biologi (pergerakan migrasi hewan), meteorologi (arah angin), geologi (arah pergeseran lempeng) dan geomorfologi (pembentukan daratan, kesesuaian bebatuan) (Cox, 2005).

U.S. *Environment Protection Agency* (US-EPA) seperti yang dikatakan Louise Camalier (2007) mengeluarkan laporan secara periodik mengenai trend kualitas udara di Amerika Serikat. Sebuah model linear yang sudah digeneralisasi yang mengakomodasi efek variabel non-linear meteorologi terhadap parameter ozon yang mana semua model mempunyai statistik R^2 sangat tinggi 0,8. Analisis mengatakan bahwa ozon secara umum naik terhadap kenaikan temperatur dan konsentrasinya turun terhadap kenaikan kelembaban. Kajian terhadap gradien spasial dari respon ini menunjukkan bahwa efek temperatur terhadap ozon nyata terjadi di Utara, sementara kebalikan terjadi pada kelembaban.

Transportasi polutan jarak jauh (*long range transport*) ozon dengan dipertinggi kadar Karbon Monoksida masa udara dari wilayah kontinental China yang teriringi dalam Monsun Timur Laut telah menyumbang kasus substansial dalam episode ozon tinggi

khususnya pada wilayah dataran tinggi (Chan, 2000). Lawrence dan Lelieveld (2010) dalam investigasinya juga menyatakan bahwa hasil dan transportasi masa udara terpolusi jarak jauh dikarakteristikkan dalam 3 bagian sirkulasi musiman yaitu Monsun dingin, Monsun Panas dan periode transisi Monsun. Selama Monsun dingin, aliran masa udara dominan dari arah Timur Laut, dan polutan regional terbentuk pada lapisan tebal dekat permukaan troposfer bawah yang terbentang lebih dari jutaan kilometer antara Asia Tenggara hingga Pias Pumpun Antar Tropis (*Inter Tropical Convergence Zone*). Selama Monsun panas, hujan secara efektif memindahkan gas-gas larut dan aerosol, sementara periode transisi Monsun aliran masa udara yang melintasi samudra Hindia umumnya zonal, dan lapisan polutan tebal baik yang berasal dari Asia Tenggara maupun dari Afrika tersebar luas di samudera Hindia.

Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang terletak pada $0,2^{\circ}\text{S}$, $100,32^{\circ}\text{E}$ berada pada ketinggian 864,5 meter dpl. Letaknya di sekitar equator memungkinkan menjadi tempat berubahnya arah angin sirkulasi regional (Monsun), dimana pada Monsun Asia (dingin) angin dominan bertiup dari arah Timur Laut menuju Tenggara, sementara kebalikannya pada Monsun Australia (panas) angin bertiup lebih dominan dari Tenggara menuju Timur Laut. Secara geografis, lokasi ini juga berada pada punggung Bukit Barisan yang memanjang di pulau Sumatera dari Aceh hingga Lampung Selatan, sehingga angin periodik lokal juga berperan secara signifikan dalam siklus harian (diurnal). Bukit Kototabang juga merupakan stasiun representatif dalam hutan tropis dan kondisi latar (*background condition*) maritim, tetapi sering dipengaruhi oleh kebakaran lahan dan transportasi jarak jauh polutan di atmosfer (Klausen *et al.*, 2007). Kondisi alam daerah sekitar dalam radius 300 km dari stasiun merupakan daerah pertanian, perkebunan dan hutan hujan tropis. Pada periode waktu tertentu para pengelola lahan melakukan peremajaan lahan perkebunan dan pertaniannya dengan membakar sisa-sisa kegiatan mereka, sehingga menimbulkan sisa pembakaran ke dalam atmosfer dalam jumlah yang banyak, terkadang lahan yang dibakarpun tidak terkendali sehingga menimbulkan kebakaran lahan dan hutan.



Gambar 1. Lokasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang berada pada dekat garis ekuator dan di atas pegunungan Bukit Barisan

METODE PENELITIAN

Sampel data dalam penulisan ini adalah arah angin (WD) dan kecepatan angin (WS) yang diambil dari data pengamatan Radiosonde Stasiun Meteorologi Tabing (WMO ID No. 96163) yang merupakan stasiun radiosonde terdekat dengan lokasi SPAG Bukit Kototabang dalam interval waktu 2 sampai 28 Februari 2008. Sementara itu, data titik api diperoleh dari melalui pantauan satelit NOAA-18 pada periode yang sama. Data

radiosonde diekstrak dan hanya diambil data arah dan kecepatan angin pada lapisan 850 mb, pada main hour 0:00 UTC dan 12:00 UTC, serta data pengamatan Pilot Balon pada *intermediate* hour 6:00 UTC. Sementara data polusi udara diambil parameter karbon monoksida pada periode yang sama yang diukur dengan alat Horiba APMA360. selain itu untuk melihat ada pengaruh keadaan cuaca di sekitar lokasi terhadap parameter polusi udara, diambil pula data kelembaban udara dan temperatur udara pada periode yang sama yang termonitor pada alat *Mobile Automatic Weather Station Vaisala*.

Arah angin rata-rata sampel dihitung dengan memperlakukan semua pengukuran angular sebagai titik dalam unit lingkaran dan menghitung vektor resultan dari vektor unit yang ditentukan oleh data point. Arah angin rata-rata adalah arah vektor resultant ini, dan panjang resultant rata-rata sampel memberikan sebuah pengukuran konsentrasi sirkular data. Yaitu, untuk sampel berukuran n observasi dari variabel sirkular α , ditentukan oleh :

$$S = \sum_{i=1}^n \sin\alpha_i \tag{1}$$

$$C = \sum_{i=1}^n \cos\alpha_i \tag{2}$$

$$R = \sqrt{C^2 + S^2} \tag{3}$$

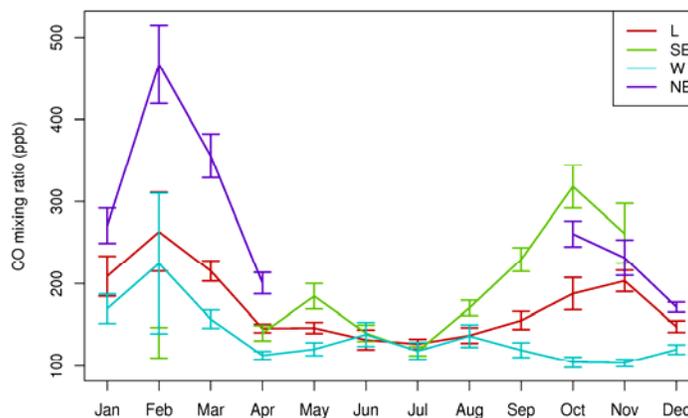
Kemudian arah rata-rata sampel $\bar{\alpha}$ adalah tangen inverse dari S/R,

$$\bar{\alpha} = \begin{cases} \arctan(S/C), & \text{jika } C \geq 0 \\ \arctan(S/C) + \pi & \text{jika } C < 0 \\ \text{Undefined,} & \text{jika } R = 0 \end{cases} \tag{4}$$

Panjang resultan rata-rata sampel diberikan oleh $\bar{R} = R/n$, salah satu yang biasanya dipakai sebagai ukuran dispersi sirkular adalah variansi sirkular yang didefinisikan sebagai $1 - \bar{R}$. Statistik ini jatuh pada interval [0, 1], nilai mendekati 0 berarti data terkonsentrasi sekitar satu arah dan mendekati ± 1 untuk data terpecah pada semua arah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klausen et. al. (2007) menemukan rasio campuran Karbon Monoksida berdasarkan cluster angin (Gambar 2) pada bulan-bulan Desember hingga April, konsentrasi tinggi Karbon Monoksida berasal dari Timur Laut, sementara bulan Mei, Agustus hingga Nopember, cluster angin pembawa konsentrasi tertinggi berasal dari Tenggara. Konsentrasi rendah sepanjang tahun terdeteksi berasal dari arah Barat dan kondisi lokal juga memberikan kontribusi nilai terukur pada kisaran median sebaran data.

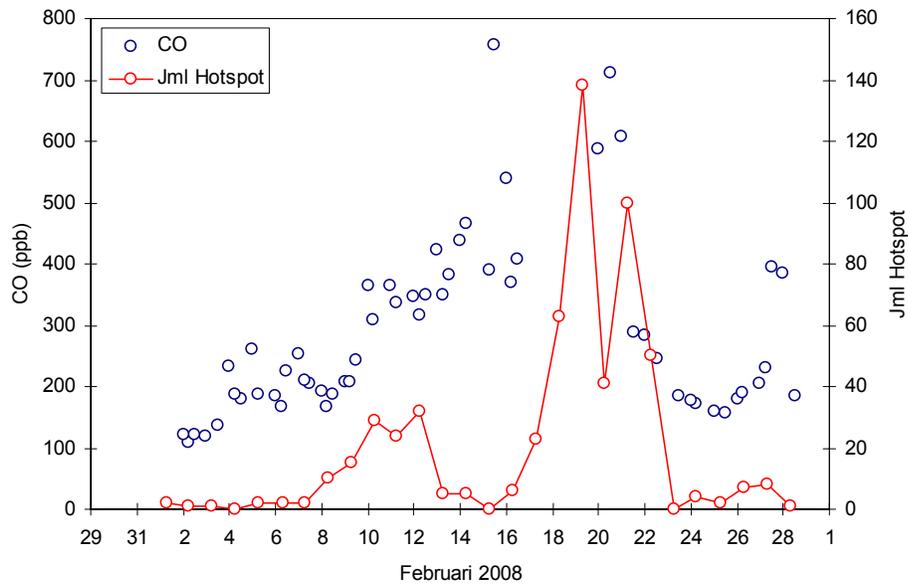


Gambar 2. *Mixing ratio by cluster* karbon monoksida terukur di Bukit Kototabang (Klausen, 2007).

Deskripsi Statistik Dan Grafik

Data dalam bentuk/dimensi angular, perambatan arahnya dan dalam sirkulasi periodik, keberadaannya dapat dinyatakan dalam kerangka data sirkular / direksional. Dalam istilah lain sirkular data adalah sesuatu yang mempunyai nilai dalam keliling suatu lingkaran dengan range sudut $(0 - 2\pi)$ radians atau $(0^\circ - 360^\circ)$. Untuk menganalisa data seperti ini, harus menggunakan teknik berbeda dari tipe variabel Eucidean (variabel Linear) biasa karena keliling lingkaran adalah ruang tertutup melingkar, yang mana konsep aslinya tak terdefinisikan. Sehingga teknik yang digunakan untuk variabel linear kontinyu tidak dapat diaplikasikan untuk data sirkular. Selanjutnya data linear kontinyu dalam garis lurus dapat dianalisa sejajar dengan teknik statistik biasa.

Pada periode observasi, telah terjadi kenaikan signifikan beberapa unsur polutan yang diukur di SPAG Bukit Kototabang. Berdasarkan pantauan hotspot melalui satelit NOAA18, tercatat sejumlah titik api secara intens di sebelah Timur lokasi pengamatan. Berdasarkan trayektori masa udara Flextra hasil analisis EMPA Switserland, jejak masa udara yang sampai di lokasi Bukit Kototabang tercatat berasal dari arah Timur Laut dan Timur, sehingga dapat dipastikan polutan yang tercatat merupakan hasil pembakaran antropogenik di sekitar titik api. Ingin diuji signifikansi pada paper ini seberapa kuat hubungan angin lapisan 850 mb terhadap transportasi polutan jarak jauh sehingga dapat terdeteksi di Bukit Kototabang.



Gambar 3. Konsentrasi Karbon Monoksida terukur dan jumlah Hotspot terpantau satelit selama periode bulan Februari 2008

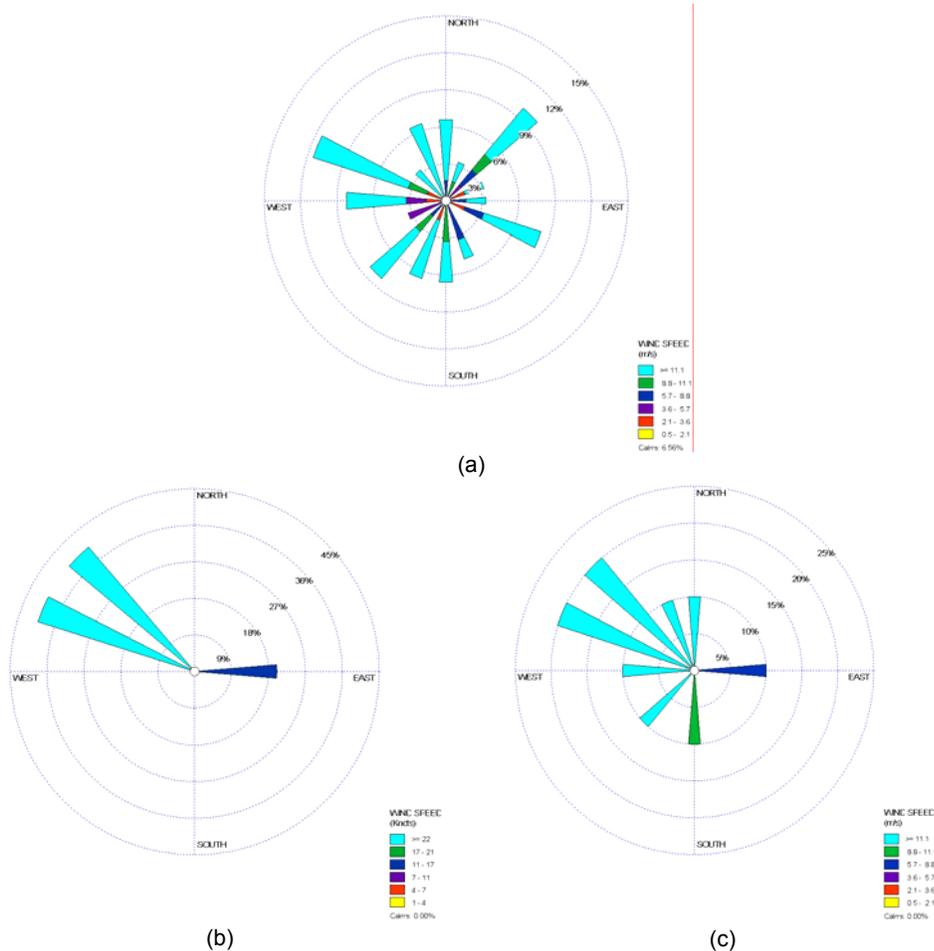
Tabel 1. Deskripsi statistik sampel data

Statistik	WD (deg)	WS (m/s)	CO (ppb)	RH (%)	T (degC)
n	57	57	57	57	57
Rata-rata	85.5	17.4	287.1	86.4	22.2
SD		16.5	146.1	15.5	3.6

Dari tabel di atas, dari sampel yang diambil sebanyak 57 buah baris data terlihat arah angin terbanyak tercatat $85,5^\circ$ atau dari Timur dengan kecepatan rata-rata 17,5 m/s dan deviasi standar 16,5 m/s. Data karbon monoksida tercatat rata-rata 287.1 ppb dan deviasi standar 146.1 ppb, dengan kelembaban rata-rata di permukaan 86,4% dan

deviasi standarnya 15,5% serta suhu udara permukaan 22.2°C dan deviasi standarnya 3,6°C.

Mawar angin (*windrose*) untuk memvisualisasikan distribusi frekuensi arah berdasarkan interval kecepatan angin ditampilkan pada Gambar 4a, 4b dan 4c di bawah ini. Pada gambar 4a merupakan mawar angin keseluruhan sampel, gambar 4b mawar angin yang telah dibebani persentil ke-10 karbon monoksida serta gambar 4c merupakan mawar angin yang dibebani persentil ke-90 data karbon monoksida.



Gambar 4. Mawar angin (*windrose*) lapisan 850 mb; a. untuk seluruh sampel, b. arah dan kecepatan angin di bawah 10th *percentile weighted by CO*, c. arah dan kecepatan angin di bawah 90th *percentile weighted by CO*.

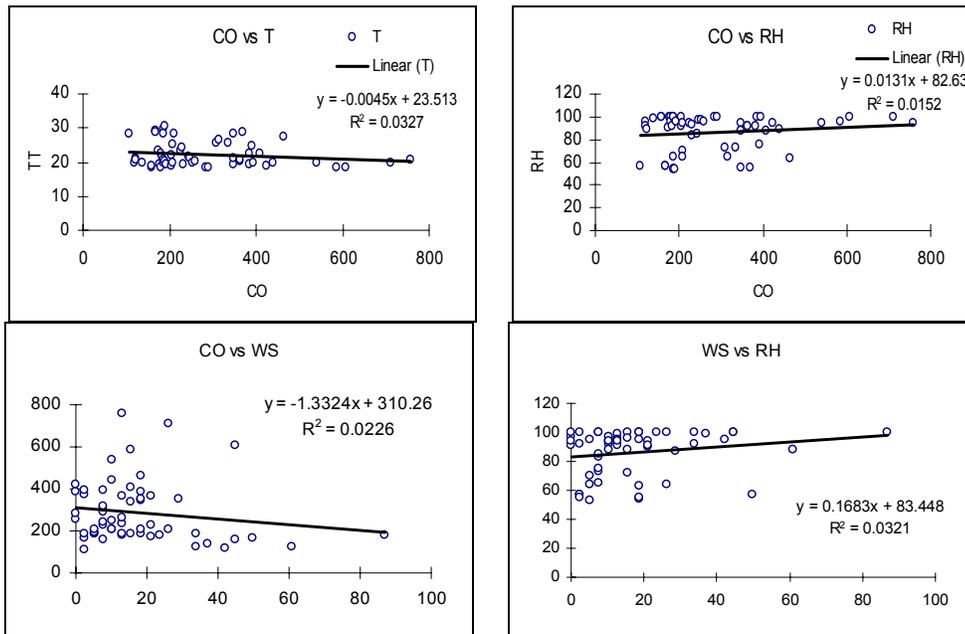
Secara keseluruhan 13,6% sampel angin dominan bertiup dari arah Barat-Utara-Barat (WNW), dan 9,1% Timur Laut (NE). Sementara persentil ke-10 dominan (80%) angin berasal dari Baratan, sementara persentil ke-90 angin masih berasal dari Baratan, bervariasi dari Utara hingga Selatan. Sangat sinkron sekali dengan penelitian Klausen (2007), untuk konsentrasi CO rendah angin berasal dari Barat, sementara pada persentile ke-90, ternyata dominasi angin pun masih dari Baratan.

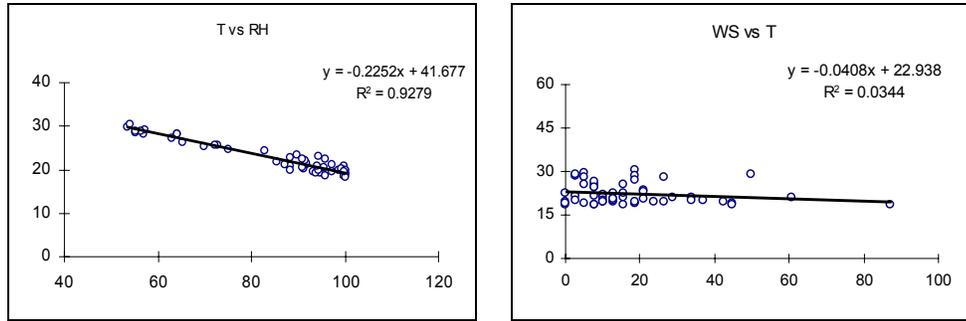
Tabel 2. Distribusi Frekuensi sampel angin lapisan 850 mb radiosonde Tabung berdasarkan klasifikasi 16 arah mata angin

Directions / Wind Classes	Wind (all)	10 th Percentile	90 th Percentile
N	6.1	0	10
NNE	3.0	0	0

NE	9.1	0	0
ENE	3.0	0	0
E	4.5	20	10
ESE	7.6	0	0
SE	0	0	0
SSE	4.5	0	0
S	6.1	0	10
SSW	6.1	0	0
SW	7.6	0	10
WSW	3.0	0	0
WSW	7.6	0	10
WNW	13.6	40	20
NW	6.1	40	20
NNW	6.1	0	10
Calms	5.8	0	0

Untuk melihat seberapa kuat hubungan bivariat, biasanya digunakan beberapa ukuran korelasi, tergantung pada pertimbangan tipe variabel apa. Yaitu ukuran korelasi berbeda dibutuhkan tergantung seberapa banyak dari dua variabel ini (tidak ada, satu atau keduanya (Jammalamadaka, 2003). Dalam paper ini akan hitung dua kasus yaitu linear-linear dan linear-sirkular. Untuk singkatnya, diuji korelasi antara suhu dan karbon monoksida dan kelembaban udara dengan karbon monoksida menggunakan koefisien korelasi Pearson. Bagaimanapun juga korelasi antara CO dan arah angin akan mengharuskan sebuah statistik linear-sirkular sebagaimana yang diterangkan Mardia (1976).





Gambar 5. Korelasi Bivariat linera-linear beberapa unsur polutan dan cuaca

Mardia menetapkan koefisien linear-sirkular sebagai korelasi multiple antara variabel X dengan sinus dan kosinus variabel sirkular α . Formulasi tepat statistik ini diberikan :

$$r^2 = \frac{r_{xc}^2 + r_{xs}^2 - 2r_{xc}r_{xs}r_{cs}}{1 - r_{cs}^2} \tag{4}$$

Di mana

$$r_{xc} = corr(x, \cos \alpha)$$

$$r_{xs} = corr(x, \sin \alpha)$$

$$r_{cs} = corr(\cos \alpha, \sin \alpha)$$

Tabel 3. Koefisien Korelasi Bivariat

Parameter	CO	T	RH	WS	WD
T	0.03207 ^a	-	-	-	-
RH	-0.01520 ^a	0.9279 ^a	-	-	-
WS	0.02260 ^a	0.0344 ^a	0.0321 ^a	-	-
WD	0.00009 ^b	0.0080 ^b	0.0160 ^b	0.0006 ^b	-

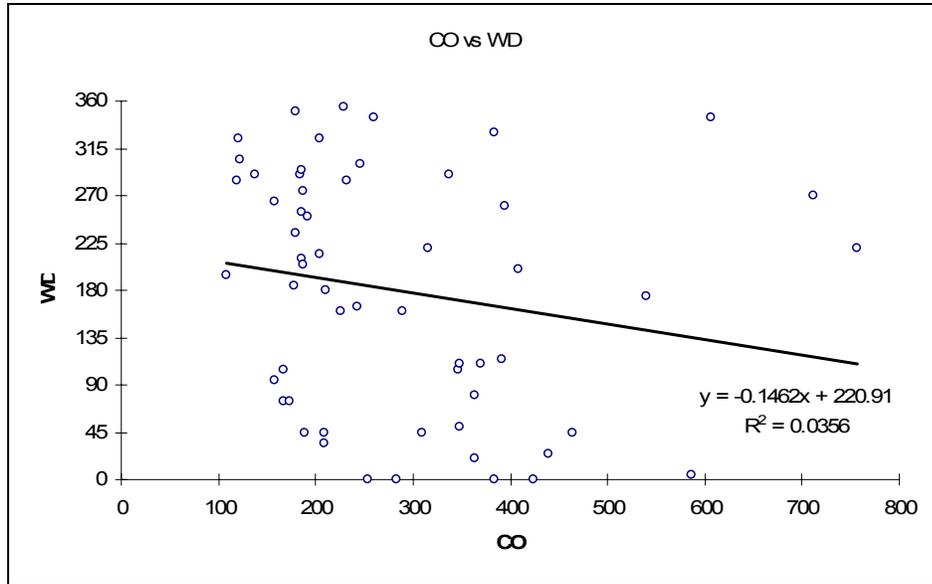
Keterangan: a = korelasi linear-linear (koefisien korelasi Pearson); b = korelasi linear-sirkular

Tabel di atas merepresentasikan kesimpulan koefisien korelasi yang dihitung untuk data sampel. Nampak temperatur menjadi unsur paling fenomenal mempunyai korelasi yang besar terhadap kelembaban, juga berkorelasi positif terhadap karbon monoksida lebih tinggi unsur lain yang berkorelasi dengan karbon monoksida. Kelembaban udara berkorelasi negatif terhadap konsentrasi karbon monoksida. Sementara arah angin berkorelasi sangat kecil terhadap parameter polutan karbon monoksida dan unsur cuaca lainnya.

Model Regresi Dan Analisis

Model regresi menggunakan data kualitas udara Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Sebuah model menggunakan data harian untuk menaksir level CO dari semua variabel dalam set data: temperatur, kecepatan angin dan arah angin. Model ini mempunyai variabel respon linear dan kombinasi dari dua variabel prediktor linear dan sirkular, data yang diambil adalah data main hour dan intermediate hour radiosonde dan arah angin model sebagai fungsi hari dalam tahun.

Awalnya sebuah model regresi linear multiple digunakan untuk memprediksi level CO dari arah angin. Ini merupakan regresi linear multiple, karena untuk mencocokkan kovariat sirkular arah angin, diikutkan sinus dan kosinus arah angin sebagai variabel prediktor, daripada variabel arah angin itu sendiri. Grafik level CO versus arah angin, bersama garis regresi diberikan dalam gambar 6.



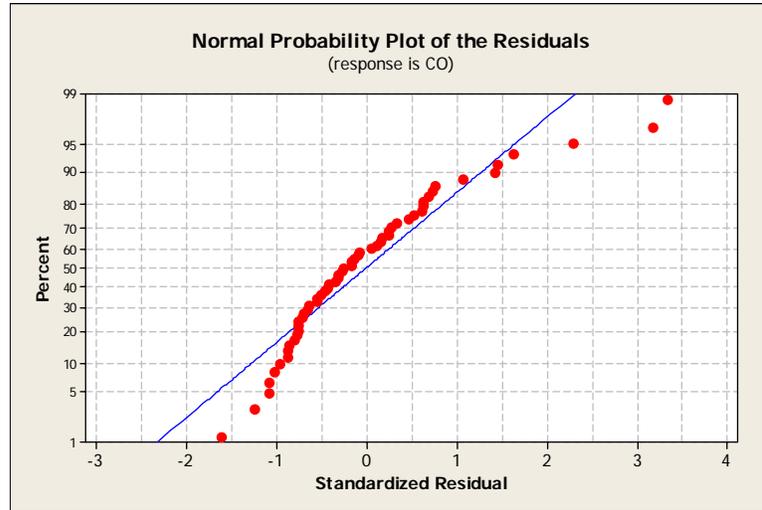
Gambar 6. level CO versus arah angin (WD)

Model regresi di sini pada dasarnya cocok dengan dua polinomial trigonometrik memperkirakan sinus dan kosinus variabel respon, pada kasus ini arah angin. Jika seandainya θ sebagai arah angin terukur, dan misalkan α menyatakan jam pengamatan, kemudian polinomial trigonometrik orde ke- m memprediksikan arah angin dari waktu dalam hari (*time of day*) akan cukup terhadap dua model regresi linear.

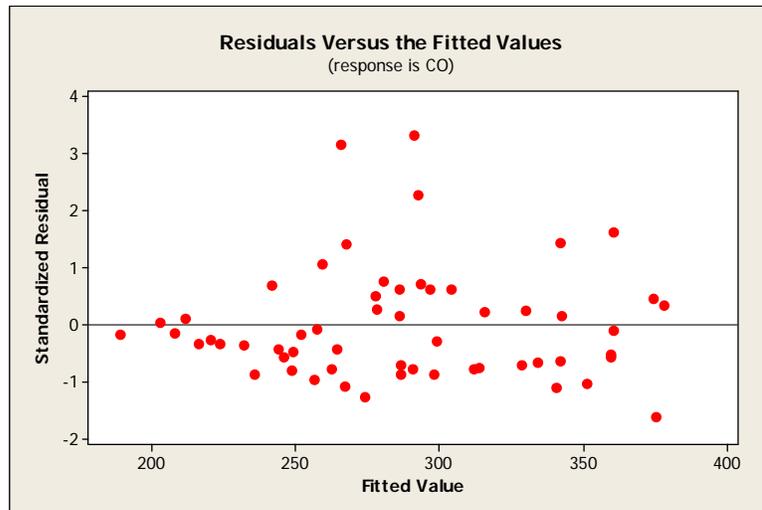
Tabel 4. Analisis variansi prediktor level karbon monoksida

Source	Df	SS	MS	F	p-value
Regression	5	132241	26448	1.27	0.291
Residual	51	1062397	20831		
Error					
Total	56	1194637			

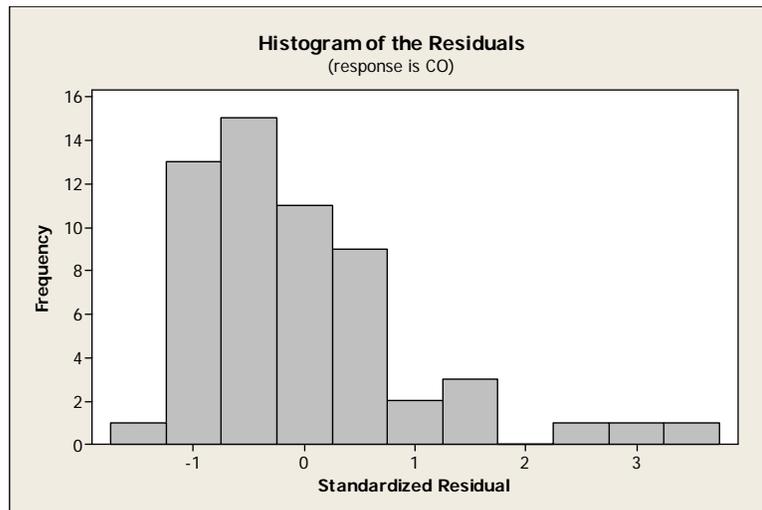
Nilai-p (p-value) pada tabel analisis variansi (Tabel 4) bernilai 0.291 menunjukkan bahwa model yang diestimasi oleh prosedur regresi signifikan pada level- α 0,05. Ini mengindikasikan bahwa setidaknya ada salah satu koefisien berbeda dari nol (0). Nilai-p (Tabel 5) untuk temperatur lebih kecil dari nilai-p kelembaban sehingga temperatur mempunyai signifikansi lebih tinggi terhadap perubahan nilai karbon monoksida pada level- α 0,05. Sementara itu nilai-p untuk kecepatan angin (WS) relatif signifikan terhadap prediksi nilai ozon ketimbang arah angin (WD) pada level- α 0,05. sebagai tambahan, rentetan nilai sum of square (SS) mengindikasikan prediktor cosinus α tidak menjelaskan suatu jumlah substansial nilai variansi unik, hal ini mengisyaratkan bahwa model hanya tepat dengan perubahan temperatur dan kecepatan angin.



Gambar 7. Grafik normal probabilitas sisaan regresi multivariat



Gambar 8. Grafik sisaan vs vitted value pada regresi multivariat karbon monoksida



Gambar 9. Grafik sisaan pada regresi multivariat karbon monoksida

Nilai R^2 mengindikasikan bahwa prediktor menjelaskan hanya 11.1% variansi level karbon monoksida. Nilai $adjusted-R^2$ 2,4%, menjelaskan sejumlah prediktor dalam model kurang mempunyai ketepatan dengan data. R^2 (*predictor*) bernilai 0.00%, karena nilai R^2 (*predictor*) kurang dekat nilai-nilai dengan R^2 dan $adjusted-R^2$, model nampak tidak *overfit* sehingga kurang cukup mempunyai kemampuan prediktif.

Tabel 5. *Multiple regression* memprediksi level karbon monoksida

<i>Predictor</i>	<i>Value</i>	<i>Stad Error</i>	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>
<i>Intercept</i>	1561.9	885.9	1.76	0.084
WS	-1.606	1.204	-1.33	0.188
T	-33.59	20.99	-1.6	0.116
RH	-5.768	4.946	-1.17	0.249
sin (WD)	19.45	30.31	0.64	0.524
cos (WD)	-0.93	28.59	-0.03	0.974

Dari tabel di atas dapat diterangkan bahwa dari ke-enam variabel yang digunakan untuk memprediksi level karbon monoksida hanya komponen sinus yang memberikan nilai positif, ini berarti bahwa ada kecenderungan kenaikan level karbon monoksida dengan kenaikan komponen sinus arah angin paras 850 mb. Sementara itu, kenaikan level karbon monoksida berkaitan erat dengan penurunan variabel yang lain. Untuk variabel kecepatan angin, konsentrasi karbon monoksida naik dengan rendahnya kecepatan angin, begitu juga penurunan konsentrasi karbon monoksida signifikan dengan terjadinya kenaikan temperatur. Selain itu, secara sinkron juga ditunjukkan kenaikan konsentrasi karbon monoksida terjadi dengan penurunan kelembaban. Kesimpulan dari regresi di atas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan regresi:

$$CO = 1562 - 1.61WS - 33.6 T - 5.77RH + 19.4\sin a - 0.9\cos a \quad (5)$$

Komponen arah angin observasi pada lapisan 850 mb secara umum tidak terlalu signifikan dalam prediksi kadar karbon monoksida di Kototabang. Tetapi lebih jauh melihat berdasarkan cluster arah angin pada periode tanggal 17 hingga 24 Pebruari, angin sangat berpotensi terhadap kadar polutan terukur. Pada *cluster* ini, arah dari Utara dan Timur membawa polutan dengan kisaran 370 – 610 ppb, sangat jauh dari nilai median sampel data. Sementara dari arah Selatan bervariasi antara 178 – 540 ppb, namun dari nilai maksimum sendiri berasal dari arah Barat pada periode, tetapi angin pada waktu ini berada pada kondisi stagnan dan kecepatan angin rendah. Nilai dari angin Baratan berada pada kisaran 246 ppb.

Nilai observasi sampel kelembaban udara 100% sangat bervariasi, mempunyai *range* 427,8 ppb (179,4 – 607.2 ppb), hal ini membuat bias variansi prediktor. Pada nilai minimum biasanya ini terjadi pada saat kondisi normal pagi hari tanpa ada gangguan asap kebakaran hutan, kondisi yang berperan adalah proses lapisan inversi yang terjadi pada malam menjelang pagi hari di Kototabang, di lain pihak, nilai maksimum terdeteksi adalah periode dimana terjadinya gangguan transportasi polutan jarak jauh dari kebakaran hutan, hal ini juga diperparah dengan adanya lapisan inversi masa udara dekat permukaan di Kototabang. Variansi nilai kecepatan udara lapisan 850 mb juga telah mempengaruhi level karbon monoksida terukur pada periode ini di Kototabang, pada keadaan angin *calm*, nilai CO bervariasi pada kisaran 250 – 430 ppb, ini berarti bahwa kondisi angin *calm*, udara stagnan tidak berpindah, sehingga menimbulkan konsentrasi tinggi level polutan dekat permukaan, sementara itu pada kecepatan angin tinggi >45 m/s konsentrasi polutan di udara makin encer, kadar CO terdeteksi sekitar 120 – 190 ppb.

Variasi suhu juga memainkan peranan yang agak signifikan pada level CO yang terukur, selama periode kebakaran hutan suhu tinggi pada siang hari menyebabkan masa udara memuai dan terangkat naik karena masanya lebih ringan, sehingga polutan ikut terangkat naik ke atmosfer lebih tinggi, pada periode ini akibat suhu udara tinggi kadar CO terukur bervariasi pada kisaran 100 – 370 ppb. Sementara itu pada suhu rendah kadar polutan mempunyai konsentrasi tinggi akibat dari masa udara yang lebih berat dan menyebar di sekitar dekat permukaan.

KESIMPULAN

Komponen angin memberikan peran paling signifikan dalam proses dinamika atmosfer terutama memindahkan polutan dari suatu tempat ke tempat lain. Konsentrasi polutan karbon monoksida terukur di Bukit Kototabang secara umum telah dipengaruhi oleh hasil kegiatan polutan dari tempat lain. Menggunakan data angin paras 850 mb telah membantu analisis kedatangan masa udara terpolusi terutama pada periode kebakaran hutan, disamping bermacam metode yang telah tersedia seperti Flextra Trayectory dan Hysplit. Dalam menganalisis data angular tentu diperlukan teknik khusus karena data tersebut tidak dapat dikategorikan sebagai variabel linear kontnyu biasa.

Periode asap kebakaran hutan pada bulan Pebruari 2008 mengisyaratkan bahwa transportasi polutan lebih dominan diakibatkan dari angin Utara sampai Selatan (komponen sinus dalam kuadran I dan II), sementara angin dari Baratan (kuadran IV) walaupun membawa polutan, tetapi karena stagnan dan kecepatan rendah, menjadikan atmosfer di sekitar Bukit Kototabang menjadi pekat dengan polutan walaupun titik api telah berkurang dari sumbernya. Disamping itu fenomena cuaca sebagaimana dapat dikategorikan sebagai variabel siklik telah memberikan dampak signifikan dan memperparah kadar polutan terukur. Temperatur udara dan kelembaban secara positif dan signifikan memberikan andil terhadap variasi polutan terukur walaupun secara umum model yang dihasilkan masih belum tepat dapat dijadikan sebagai variabel prediktif untuk menaksir kadar polutan karbon monoksida di Bukit Kototabang terutama pada periode asap kebakaran hutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arnold, S. L.. *A Minimum Variance Approach To Estimating Wind Direction Statistics*. ENSCO, Inc., Vandenberg AFB, CA.
- Camalier, L., William Cox, & Pat Dolwick. 2007. *The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends*. <http://www.sciencedirect.com/>.
- Chan, C. Y. and L. Y. Chan. 2000. Effect of meteorology and air pollutant transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong. *Journal Of Geophysical Research, Vol. 105, NO. D16, PP. 20707-20724*.
- Jammalamadaka, S. R. and Y.R. Sarma. 1988. *A correlation coefficient for angular variables*. In Matusita, K., editor, "Statistical Theory and Data Analysis II, pages 349-364. North Holland, Amsterdam.
- Jammalamadaka, S. R. and A. SenGupta. 2001. *Topics in Circular Statistics*. World Scientific Press, Singapore.
- Jammalamadaka, S. R., and U. J. Lund. *The effect of wind direction on ozone levels - a case study*. University of California, Santa Barbara and California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- Klausen, J., C. Zellweger, S. Henne, A. F. Ilahi, C. Siregar. 2007. *Surface Ozone and Carbon Monoxide Measurements at Bukit Koto Tabang – Achievements and Challenges*, BKT Symposium, 2/3 August 2007, BMG Jakarta.
- Lawrence, M. G. and J. Lelieveld. 2010. *Atmospheric pollutant outflow from southern Asia: a review*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11017–11096.
- Mardia, K.V. 1976. Linear-Circular Correlation And Rhythmometry. *Biometrika* 63, 403-405.
- Cox, N. J. 2005 *To the vector belong the spoils: Circular statistics in Stata*. Stata Users' Meeting Milano. Geography Department, Durham University.
- Rainham, D.G.C., K. E. Tomic, S. C. Sheridan, R. T. Burnett. *Synoptic Weather Patterns And Modification Of The Association Between Air Pollution And Human Mortality*. University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada.

BIODATA PENULIS

- Supriyanto Rohadi. Lahir di Purworejo, 28 Oktober 1969. Menyelesaikan pendidikan Strata 2 di Institut Teknologi Bandung pada Jurusan Geofisika. Saat ini bekerja sebagai staf di Balai Besar BMKG Wilayah II Ciputat dan merupakan kandidat Doktor dari Institut Teknologi Bandung.
- Guswanto. Lahir di Kediri, 10 Maret 1972. Memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Geografi Universitas Indonesia pada tahun 1999. Menyelesaikan pendidikan Strata 2 pada Jurusan Geografi Terapan di Universitas Indonesia pada tahun 2006. Saat ini bekerja Kepala Bidang Manajemen Data Balai Besar BMKG Wilayah II Ciputat.
- Herizal. Lahir di Jakarta, 4 Juli 1961. Tamat pendidikan Diploma III Meteorologi BPLMG Badan Diklat Departemen Perhubungan tahun 1984. Memperoleh gelar Sarjana Fisika dari Universitas Indonesia tahun 1994. Memperoleh gelar Magister Sains Ilmu Lingkungan dari Program Pascasarjana Ilmu Lingkungan Universitas Negeri Padang tahun 2005. Saat ini menjabat sebagai Kepala Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.
- Agusta Kurniawan. Lahir di Yogyakarta, 20 Agustus 1979. Menamatkan pendidikan Strata 1 pada tahun 2002 dari Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada. Memperoleh gelar Magister Sains dari Pascasarjana Universitas Gadjah Mada pada tahun 2004 di bidang Kimia Lingkungan. Saat ini menjabat sebagai staf Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.
- Rully Affandi. Lahir di Pontianak, 22 Mei 1979. Saat ini sedang menempuh Pendidikan Strata 1 di Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian Institut Teknologi Bandung. Sehari-harinya bekerja di Balai Besar BMKG Wilayah V Jayapura.
- Asep Firman Ilahi. Lahir di Bogor, 5 Januari 1975. Menamatkan pendidikan Diploma III dari AMG Jurusan Meteorologi pada tahun 2001. Saat ini menjabat sebagai Kepala Seksi Observasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.