

ISSN 2086-5589



VOL. 2 NO.2 / JUNI 2011

megAsains

BULETIN METEOROLOGI, KLIMATOLOGI, KUALITAS UDARA, GEOFISIKA, DAN LINGKUNGAN



MEGASAINS © 2011
Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang
Telp. (0752) 7446089 / Fax. (0752) 7446449
e-mail: stagaw.kototabang@bmkg.go.id

ISSN 2086-5589



9 772086 558003



BMKG

STASIUN PEMANTAU ATMOSFER GLOBAL BUKIT KOTOTABANG
BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA

megAsains

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

Vol. 2 No. 2 – Juni 2011

Diterbitkan Oleh :
Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

SUSUNAN REDAKSI

PENANGGUNG JAWAB

Drs. Herizal, M.Si.

EDITOR

Dra. Nurhayati, M.Sc
Dr. Edvin Aldrian, B.Eng, M.Sc
Dr. Ir Dodo Gunawan, DEA
Dr. Wandono
Dr. Hamdi Rivai

REDAKTUR

Sugeng Nugroho, M.Si.

REDAKTUR PELAKSANA

Agusta Kurniawan, M.Si
Alberth Christian Nahas, S.Si
Carles Siregar, ST
Yosfi Andri, ST

DESIGN LAYOUT

Asep Firman Ilahi, Ah. MG
Aulia Rinadi, Ah. MG

SEKRETARIAT

Irwin. A
Darmadi, A. Md
Yosi Juita, A. Md

MEGASAINS

MEGASAINS merupakan buletin yang diterbitkan oleh Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit kototabang sebagai media penguangan 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 hendaknya 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 kiri-kanan, 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:

Redaksi MEGASAINS

PO BOX 11 Bukittinggi 26100

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

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.

Memasuki tahun kedua penerbitannya, MEGASAINS terus melakukan berbenah diri. Pembetulan itu tidak saja dari segi tampilan, tapi juga dari isi yang diharapkan semakin memperkaya khasanah pembaca di bidang Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, Geofisika, dan Lingkungan. Pada edisi perdana di Volume Kedua ini, MEGASAINS kembali menerbitkan enam karya tulis yang mewakili semua bidang yang menjadi kajian buletin ini.

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, Juni 2011

Daftar Isi

	halaman
Susunan Redaksi	iii
Dari Redaksi	iv
Daftar Isi	v
KONDISI KUALITAS UDARA BUKIT KOTOTABANG PERIODE 2005-2010 <i>Alberth Christian Nahas</i>	60 - 73
SIMULASI ANGIN FOHN DI SEBELAH TIMUR BUKIT BARISAN SUMATERA UTARA MENGGUNAKAN MODEL CUACA NUMERIK WRF-ARW Studi Kasus 12 Agustus 2005 <i>Dian Mayangwulan, Alif Adiyasa, Riza Arian Noor, Sevti Viqa Haiyqal, dan Karin Nadira</i>	74 - 82
KARAKTERISTIK PM ₁₀ DI WILAYAH KEMAYORAN JAKARTA <i>Edison Kurniawan, Nuraliyanti, Mizani Ahmad, dan Budi Setiawan</i>	83 - 91
IDENTIFIKASI AWAL PERUBAHAN IKLIM MIKRO TERHADAP RUANG TERBUKA HIJAU/AIR DALAM KONSEP GREENCITY DI KOTA SEMARANG BERDASARKAN STUDI LITERATUR <i>Guswanto</i>	92 - 102
OZON PERMUKAAN TERPANTAU DI KOTA PADANG (0°53'42S, 100°20'48E) SUMATERA BARAT, INDONESIA <i>Asep Firman Ilahi, Aulia Rinadi, dan Ahmad Fauzi</i>	103 - 115
TINJAUAN KASUS BANJIR DI KEPULAUAN RIAU AKHIR JANUARI 2011 <i>Imam Prawoto, Nur Azizah, dan Muhammad Taufik</i>	116 - 122

KONDISI KUALITAS UDARA BUKIT KOTOTABANG PERIODE 2005-2010

Alberth Christian Nahas

ABSTRACT

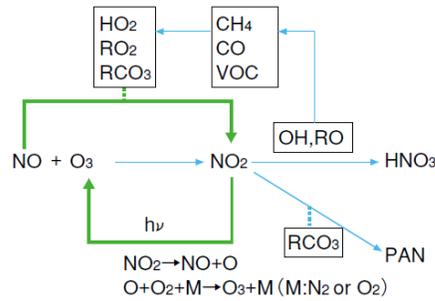
Assessment of air quality condition at Bukit Kototabang for the period 2005-2010 has been done. Three air quality parameters were used in this research: surface ozone (O_3), carbon monoxide (CO), and aerosol PM_{10} . Measured concentrations of these parameters were then standardized to an index called Indonesian Air Pollution Index (Indeks Standar Pencemaran Udara/ISPU). Results showed that air quality at Bukit Kototabang was influenced strongly by precipitation intensity, hotspot, and wind trajectory. During the period, aerosol PM_{10} is the main air polluting parameter, with the highest concentration and ISPU number. Despite of land-use changes and wildfire episodes, results showed that air quality at Bukit Kototabang is mainly in good condition, with less than 4% of total days in the period classified as moderate or unhealthy condition.

Keywords: air quality, Bukit Kototabang, ISPU.

PENDAHULUAN

Sebagai stasiun referensi udara bersih di Indonesia, Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang - yang selanjutnya disebut sebagai Stasiun - dipandang memiliki kualitas udara yang baik. Berlokasi pada ketinggian 864.5 m dari permukaan laut pada daerah perbukitan dengan aktivitas antropogenik yang minimum, Stasiun ini dianggap sangat cocok untuk menggambarkan kondisi kualitas udara untuk daerah yang jauh dari sumber emisi polutan udara (daerah *background*). Dalam perspektif global dan regional, daerah *background* merujuk pada suatu daerah yang kondisi atmosfernya tidak dipengaruhi oleh sumber-sumber emisi antropogenik lokal dan regional (Pochanart *et al.*, 2003). Namun demikian, dalam perkembangannya, daerah di sekitar Stasiun tidak luput dari terjadinya perubahan-perubahan, baik berskala lokal dan regional. Perubahan fungsi lahan, peningkatan volume transportasi, dan kebakaran hutan merupakan beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kualitas udara di Bukit Kototabang. Beberapa jenis polutan udara yang rentan terhadap faktor-faktor di atas antara lain ozon permukaan (O_3), karbon monoksida (CO), dan aerosol PM_{10} .

Produksi O_3 di troposfer merupakan hasil dari reaksi fotokimia berbagai polutan udara (Gambar 1). Selain sebagai polutan udara, O_3 di troposfer juga dikenal sebagai salah satu gas rumah kaca (IPCC, 2001). Pengukuran O_3 permukaan di daerah *background* menarik perhatian kalangan ilmuwan karena hasilnya dapat digunakan sebagai tolok ukur untuk melakukan reduksi terhadap prekursor-prekursornya (Chevalier *et al.*, 2007). Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi O_3 permukaan. Penelitian oleh Marengo *et al.* (1994) menunjukkan konsentrasi O_3 permukaan di Pic du Midi (2877 m) meningkat 5 kali lipat pada periode 1980an, dibandingkan dengan konsentrasinya pada periode 1870-1910. Sementara itu, Oltsman *et al.* (2006) mencatat peningkatan konsentrasi O_3 sebesar 12.6% per dekade di Zugspitze antara tahun 1978-2004. Staehelin *et al.* (1994) memperlihatkan adanya peningkatan konsentrasi O_3 di Arosa (Swiss) sebanyak dua kali lipat antara tahun 1950an sampai dengan 1990an.



Gambar 1. Proses reaksi fotokimia pembentukan O₃ di troposfer (ADORC, 2006)

Seperti halnya O₃, CO juga menjadi salah satu polutan udara. CO merupakan gas reaktif dengan waktu tinggal di troposfer yang bervariasi, dari 10 hari di daerah tropis sampai dengan satu tahun di daerah kutub (Holloway *et al.*, 2000). Pada episode kebakaran hutan, CO merupakan gas kedua terbanyak yang diemisikan setelah karbon dioksida (CO₂). Namun demikian, pengaruhnya terhadap konsentrasi CO di daerah *background* lebih terasa. Hal ini disebabkan konsentrasi CO di troposfer jauh lebih rendah daripada konsentrasi CO₂ (Andreae and Merlet, 2001).

Selain CO, kebakaran hutan juga menjadi sumber emisi aerosol. Emisi ini berasal dari partikel dari hasil pembakaran biomassa yang terbawa oleh aliran massa udara. Emisi aerosol memiliki dampak yang sangat besar terhadap ekosistem, melalui deposisi asam dan efek lanjutannya terhadap pertanian dan kualitas air (Chameides *et al.*, 1999). Penurunan kualitas udara akibat konsentrasi aerosol yang tinggi juga berbahaya terhadap kesehatan manusia.

Indonesia selalu dihadapkan pada masalah kebakaran hutan. Daerah yang rentan terhadap kejadian ini adalah daerah dengan tingkat vegetasi yang tinggi atau daerah yang didominasi oleh lahan gambut. Daerah ini banyak dijumpai di Pulau Kalimantan dan Sumatera. Pada tahun 1997/1998, kebakaran hutan melanda sebagian besar wilayah Indonesia, terutama Pulau Kalimantan dan Sumatera. Dampak fenomena *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) menyebabkan setidaknya 9.75 juta ha hutan dan lahan di Indonesia terbakar (BAPPENAS-ADB, 1999). Kabut asap yang ditimbulkan sebagai akibat dari peristiwa ini menutupi tidak hanya wilayah Indonesia, tetapi sampai juga pada beberapa negara tetangga seperti Malaysia dan Singapura. Menurut Glover (2001), kebakaran lahan di Indonesia pada periode tersebut merupakan salah satu bencana lingkungan terburuk di abad 20, mengingat dampak kerusakan yang ditimbulkan dan jumlah karbon yang diemisikan.

Berdasarkan data emisi global yang dihimpun dalam *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR, versi 3.2FT2000; Oliver *et al.*, 2005) untuk tahun 2000, emisi gas CO₂, CO, dan NO_x terbesar untuk kawasan Asia bagian Selatan - yang didalamnya termasuk Indonesia - bersumber dari pembakaran biomassa dan *biofuel*. Rerata total emisi dari gas-gas ini melebihi rerata globalnya (Lawrence and Lelieveld, 2010).

Salah satu tolok ukur yang dapat digunakan untuk mengukur tingkat kualitas udara di suatu daerah di Indonesia adalah dengan menggunakan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU). Berdasarkan PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, ISPU didefinisikan sebagai angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Meskipun nilai ISPU lebih tepat digunakan untuk daerah urban, pada prinsipnya nilai ini dapat diterapkan ke semua tipe wilayah. Parameter-parameter yang digunakan dalam penentuan nilai ISPU dituangkan dalam Lampiran Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan No. 107 Tahun 1997 tentang Perhitungan dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standar Pencemaran Udara (Tabel 1).

Tabel 1. Parameter dasar untuk pengukuran ISPU dan periode waktu pengukurannya.

No.	Parameter	Waktu Pengukuran (Rata-rata)
1.	Partikulat (PM ₁₀)	24 jam
2.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	24 jam
3.	Karbon Monoksida (CO)	8 jam
4.	Ozon (O ₃)	1 jam
5.	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam

Sumber: Lampiran Kep. Kepala Bapedal No. 107 Tahun 1997.

Hasil perhitungan nilai ISPU digunakan untuk melakukan kategorisasi kondisi kualitas udara di suatu tempat. Kualifikasi tersebut didasarkan pada nilai ISPU dari parameter pencemar utama. Kualifikasi kondisi kualitas udara tersebut dirangkum dalam Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Kategori kualitas udara berdasarkan nilai ISPU

ISPU	Kategori
1 – 50	Baik
51 – 100	Sedang
101 – 199	Tidak Sehat
200 – 299	Sangat Tidak Sehat
> 300	Berbahaya

Sumber: Lampiran Kep. Kepala Bapedal No. 107 Tahun 1997.

Seluruh parameter yang diperhitungkan dalam penentuan nilai ISPU telah diukur di Stasiun. Pengukuran parameter tersebut dilakukan dengan dua metode, yaitu metode *monitoring* dan metode *sampling*. *Monitoring* dilakukan dengan menggunakan instrumen yang mengukur konsentrasi gas secara kontinu. Pembacaan hasil pengukuran ditampilkan secara *near real time*. Metode *sampling* dilakukan dengan menggunakan filter yang telah dipreparasi sebelumnya. Periode *sampling* telah ditentukan dan analisis hasil *sampling* dilakukan setelah proses *sampling* selesai dilakukan. Di Stasiun, seluruh gas telah diukur secara *monitoring* sedangkan untuk SO₂ dan NO₂ juga dilakukan *sampling*.

Tujuan dari tulisan ini adalah untuk memberikan suatu gambaran kondisi kualitas udara di Bukit Kototabang pada periode 2005-2010. Kondisi tersebut dikuantifikasi dengan menggunakan nilai ISPU dari beberapa parameter. Dari seluruh parameter ISPU hanya tiga parameter saja yang diperhitungkan. Hal ini didasarkan karena ketiga parameter tersebut memiliki rentang data yang lebih panjang dan pengukurannya dilakukan secara *monitoring* atau terus menerus, serta dengan ketersediaan data yang mencukupi. Ketiga parameter tersebut adalah O₃, CO, dan aerosol PM₁₀. Selain itu, dari hasil pengukuran yang diperoleh, konsentrasi gas SO₂ dan NO₂ yang terukur di Bukit Kototabang relatif kecil sehingga kontribusinya dalam penentuan ISPU tidak signifikan.

METODE PENELITIAN

Lokasi

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang terletak di suatu bukit dengan ketinggian 864.5 m dpl pada posisi koordinat 0°12'0" LS dan 100°19'19" BT. Pada radius 3 hingga 5 km dari titik koordinat, bukit tersebut merupakan bukit yang tertinggi dengan kondisi topografi di lingkungan sekitarnya berbukit-bukit. Kondisi iklim yang tercatat di Stasiun periode 1997-2009 menunjukkan: suhu udara rata-rata 21.5-22.7°C, kelembaban udara rata-rata 86.7-91.3%, arah angin dominan berasal dari tenggara (22.9%), timur (13.4%), selatan (8.3%) dan kondisi angin tenang sebesar 42.6% dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 0.59 m/s (Nugroho, 2010).

Data

Data yang digunakan dalam tulisan ini adalah data konsentrasi O₃, CO, dan PM₁₀, curah hujan di Bukit Kototabang, serta data jumlah titik api di Pulau Sumatra pada periode 2005-2010 dengan resolusi yang disesuaikan menurut keperluan analisis. Data O₃, CO, dan PM₁₀ yang digunakan adalah data hasil *monitoring* di Bukit Kototabang. Prosentase jumlah data yang digunakan untuk ketiga parameter tersebut secara berturut-turut adalah 93.5%, 75.0%, dan 81.2%. Rentang waktu yang digunakan adalah dari pukul 00.00 sampai dengan pukul 23.59, berbeda dengan Lampiran Kep. Kepala Bapedal No. 107 Tahun 1997, yang menggunakan rentang waktu dari pukul 15.00 sampai dengan pukul 14.59 hari berikutnya. Oleh karena dalam tulisan ini lebih menitikberatkan pada variasi diurnal dan harian dari

masing-masing parameter, maka rentang waktu disesuaikan dalam hari yang sama. Untuk trayektori angin, data diambil dari hasil trayektori FLEXTRA.

- Ozon permukaan (O_3)

Pengukuran ozon permukaan dilakukan dengan menggunakan instrumen TEI Tipe 49C *Ozone Analyzer*. Detail mengenai metode pengukuran dan hasil pengukuran beserta koreksinya ini dapat dilihat pada publikasi lain (misalnya: Klausen *et al.*, 2003; Ilahi, 2010). Resolusi data dibuat menjadi agregat per jam untuk selanjutnya diproses sesuai dengan keperluan perhitungan nilai ISPU. Luaran data konsentrasi O_3 memiliki satuan *parts per billion* (ppb).

- Karbon monoksida (CO)

Data hasil pengukuran karbon monoksida diperoleh dari instrumen TEI 48C *CO Analyzer* (2005-2007) dan HORIBA APMA360 *CO Analyzer* (2007-2010). Kedua instrumen menggunakan metode *Non-Dispersive Infra Red (NDIR) Spectroscopy*. Konsentrasi CO dihitung berdasarkan kompensasi pengurangan intensitas cahaya berdasarkan prinsip Beer-Lambert. Resolusi data yang dihasilkan kemudian diolah menjadi agregat per jam untuk diproses lebih lanjut sesuai dengan keperluan perhitungan nilai ISPU. Luaran data konsentrasi CO memiliki satuan ppb.

- Aerosol PM_{10}

Aerosol PM_{10} diukur dengan menggunakan instrumen BAM1020. Instrumen ini bekerja berdasarkan prinsip pelemahan partikel beta yang melalui materi padatan yang dikumpulkan dalam pita filter yang terbuat dari fiber. Materi padatan yang terkumpul dalam filter fiber tidak lain adalah PM_{10} dalam satu volume udara ambien yang dihisap oleh pompa. Konsentrasi PM_{10} juga ditentukan dari kompensasi pengurangan intensitas cahaya berdasarkan prinsip Beer-Lambert. Data yang dihasilkan oleh instrumen ini sudah dalam resolusi per jam. Luaran data konsentrasi PM_{10} memiliki satuan $\mu g/m^3$.

- Curah Hujan

Data curah hujan diperoleh dari *Mobile Automatic Weather Station (MAWS)* Vaisala Tipe 101 (2005-2009) dan Tipe 201 (2009-2010), serta penakar hujan obs untuk data yang tidak tersedia dari MAWS. Resolusi data yang digunakan adalah jumlah bulanan.

- Titik Api

Data jumlah titik api diambil dari *database* Kementerian Kehutanan Republik Indonesia. Data yang digunakan hanya jumlah titik api untuk Pulau Sumatera sebagai sumber emisi terdekat yang berada di sekitar Bukit Kototabang. Resolusi data yang digunakan seperti yang disediakan oleh *database* adalah data harian. Jumlah dan rerata bulanan digunakan berdasarkan data harian tersebut.

- Trayektori angin

Trayektori angin diperoleh dari trayektori FLEXTRA Bukit Kototabang yang dapat diunduh di <http://gaw.empa.ch/gawdata/trajecs.asp?qawid=BKT>. Plot dibuat berdasarkan perhitungan *backward trajectory* 10 harian dalam basis waktu 4 jam. Data plot diperoleh dari hasil analisis model ECMWF (*European Centre for Meteorological Weather Forecast*) per 6 jam dan data lapangan per 4 jam dengan resolusi horizontal $1^\circ \times 1^\circ$.

Pengolahan Data

- Koreksi data

Untuk menghitung nilai ISPU, seluruh data konsentrasi O_3 , CO, dan PM_{10} dikoreksi pada keadaan STP (temperatur udara 25 C dan tekanan udara 1 atm). Koreksi tersebut dihitung dengan Persamaan (1) berikut:

$$X_1 = \frac{T_0}{T_1} \times \frac{p_1}{p_0} \times X_0 \quad (1)$$

dengan:

X_0 = konsentrasi awal

X_1 = konsentrasi terkoreksi

T_0 = temperatur udara STP (K)

T_1 = temperatur udara rata-rata (K)

p_0 = tekanan udara STP (Pa)

p_1 = tekanan udara rata-rata (Pa)

Temperatur dan tekanan udara rata-rata yang digunakan adalah rata-rata periode 2005-2010. Konsentrasi yang digunakan dalam perhitungan ISPU adalah $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sehingga data O_3 dan CO harus dikonversi terlebih dahulu menurut Persamaan (2) berikut:

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{p \times M_r}{R \times T} \times \frac{\text{ppb}}{1000} \tag{2}$$

dengan:

- p = tekanan udara (Pascal)
- M_r = massa molekul relatif (g/mol)
- R = konstanta gas ideal ($8.314 \text{ N m mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- T = temperatur udara (Kelvin)

Untuk persamaan ini, nilai p dan T digunakan pada kondisi STP.

▪ Perhitungan nilai ISPU

Perhitungan nilai ISPU mengacu pada Tabel 3 yang memuat nilai batas atas tiap level Indeks Standar Pencemaran Udara dalam satuan SI.

Tabel 3. Batas Atas Indeks Standar Pencemaran Udara dalam Satuan SI.

ISPU	1 jam O_3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8 jam CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 jam PM_{10} $\mu\text{g}/\text{m}^3$
0	0	0	0
50	120	5	50
100	235	10	150
200	400	17	350
300	800	34	420
400	1000	46	500
500	1200	57.5	600

Sumber: Lampiran Kep. Kepala Bapedal No. 107 Tahun 1997 (nilai 0 disisipkan dalam tabel untuk mempermudah pemahaman dalam perhitungan).

Periode paparan seperti yang disebutkan dalam Tabel 1 menentukan resolusi data yang digunakan dalam perhitungan. Untuk O_3 , data yang digunakan dalam perhitungan adalah nilai maksimum dari rata-rata per jam dalam satu hari. Data konsentrasi CO yang digunakan dalam perhitungan dipilih dari nilai maksimum dari rata-rata per 8 jam dalam satu hari. Data rerata per jam konsentrasi CO ke dalam 3 rentang waktu, yaitu pukul 00.00 – 07.00, pukul 08.00 – 15.00, dan pukul 16.00 – 23.00. Dari ketiga rentang waktu tersebut, data pada rentang waktu yang memiliki nilai tertinggi yang digunakan dalam perhitungan. Sementara itu, rerata harian konsentrasi PM_{10} digunakan dalam perhitungan.

Konversi tiap parameter menjadi nilai ISPU dihitung berdasarkan Persamaan 3 berikut:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \tag{3}$$

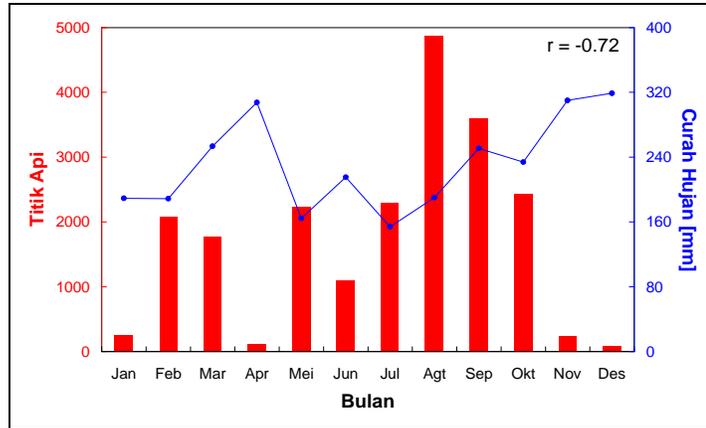
dengan:

- I = ISPU terhitung
- I_a = ISPU batas atas
- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = ambien batas atas
- X_b = ambien batas bawah
- X_x = konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran

Nilai I_a dan I_b merupakan nilai ISPU di mana X_x berada di kisaran X_a dan X_b . Sebagai contoh, jika konsentrasi PM_{10} sebesar $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, perhitungan ISPU menggunakan I_a dan I_b berturut-turut sebesar 200 dan 100 karena konsentrasi PM_{10} berada di kisaran $150\text{-}350 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

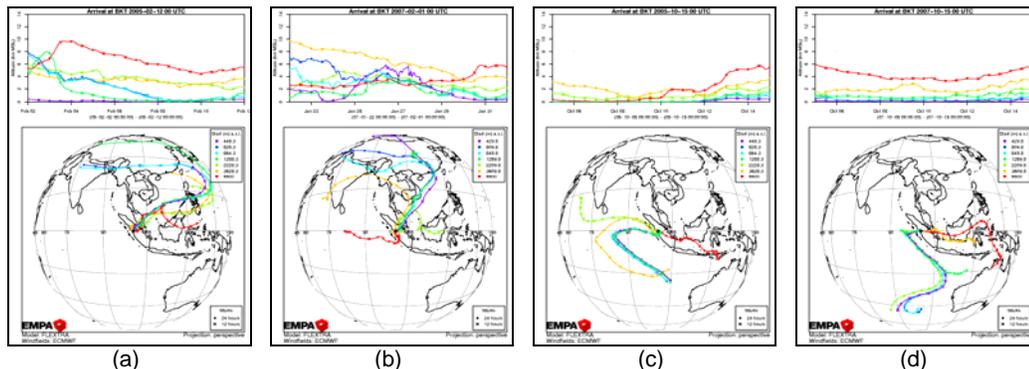
HASIL DAN PEMBAHASAN

Rata-rata bulanan jumlah titik api di sekitar Pulau Sumatera dan curah hujan di Bukit Kototabang periode 2005-2010 ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rata-rata bulanan jumlah titik api di Pulau Sumatera dan curah hujan di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Dari Gambar 2 terlihat bahwa jumlah titik api dan curah hujan memiliki korelasi yang cukup kuat ($r = -0.72$). Bukit Kototabang dengan pola curah hujan ekuatorial memiliki dua puncak curah hujan yang pada periode 2005-2010 berada di bulan Maret/April dan November/Desember. Pada bulan-bulan tersebut, hanya sedikit titik api yang terpantau di Pulau Sumatera. Sebaliknya, pada bulan di mana jumlah curah hujan yang terukur rendah, yaitu bulan Mei-Agustus, titik api yang terpantau di Pulau Sumatera jauh lebih banyak. Bulan Februari-Maret dan Agustus-Oktober merupakan dua periode di mana jumlah titik api paling banyak terpantau. Kondisi ini akan memiliki pengaruh pada kualitas udara di Bukit Kototabang, yang akan dibahas pada bagian selanjutnya.

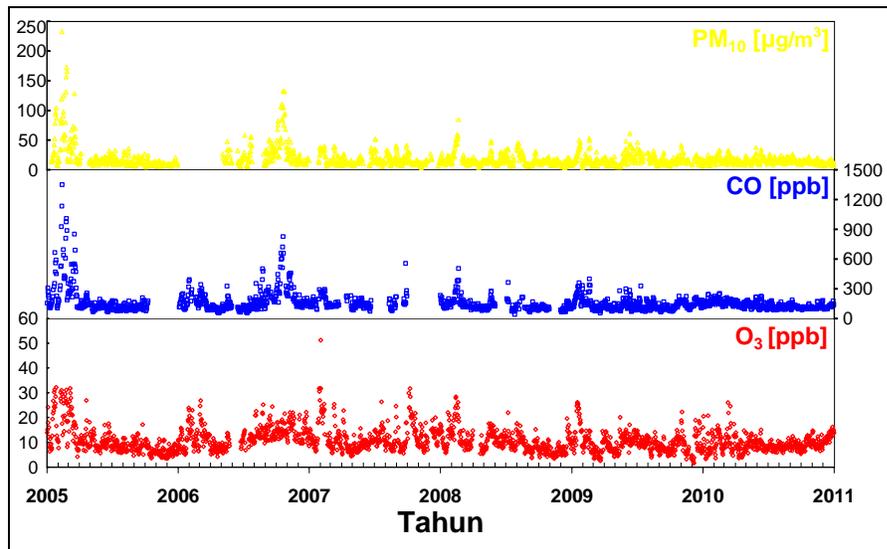


Gambar 3. Trayektori angin pada berbagai lapisan ketinggian yang mengarah ke Bukit Kototabang pada tanggal (a) 12 Februari 2005 pukul 00 UTC; (b) 1 Februari 2007 pukul 00 UTC; (c) 15 Oktober 2005 pukul 00 UTC; dan (d) 15 Oktober 2007 pukul 00 UTC.

Contoh trayektori angin yang mengarah ke Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 3. Gambar tersebut mengambil kejadian tanggal 12 Februari 2005 dan 1 Februari 2007. Pada kedua hari tersebut, konsentrasi ketiga parameter kualitas udara mencapai nilai maksimum dan dapat terlihat bahwa arah angin lapisan bawah dan menengah yang bertiup ke Bukit Kototabang berasal dari arah Timur dan Timur Laut. Sebagai perbandingan, Gambar 3(c) dan (d) memperlihatkan trayektori angin di bulan Oktober pada 2005 dan 2007. Terlihat perbedaan arah angin yang menuju pada Bukit Kototabang di mana pada periode ini angin lapisan bawah dan menengah dominan berasal dari arah Selatan dan Tenggara. Trayektori ini sangat berpengaruh pada kondisi kualitas udara yang terukur di Bukit Kototabang. Arah angin yang berasal dari sumber kebakaran hutan atau dari wilayah yang banyak dijumpai titik api, berpotensi membawa polutan udara ketika bergerak ke Bukit Kototabang. Hal ini yang menyebabkan terjadinya perbedaan konsentrasi parameter kualitas udara yang terukur di Bukit Kototabang pada kedua periode kebakaran hutan, meskipun jumlah titik api yang terpantau hampir sama.

Parameter Kualitas Udara

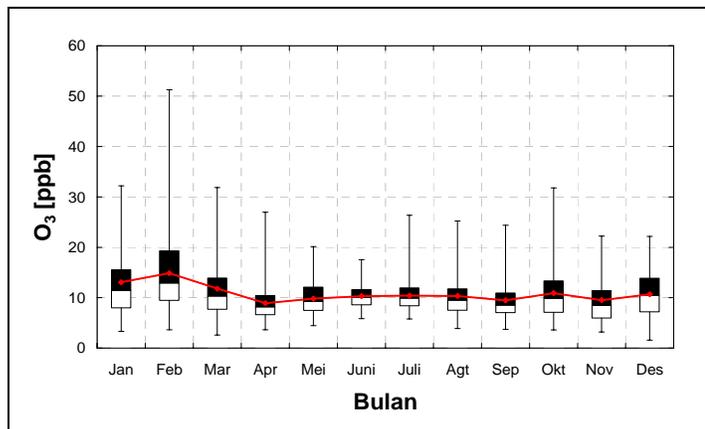
Kondisi tiga parameter kualitas udara yang terukur di Bukit Kototabang pada periode 2005-2010 diperlihatkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 4. Konsentrasi O₃, CO, dan PM₁₀ di Bukit Kototabang periode 2005-2010

Gambar 4 di atas memperlihatkan adanya kesamaan variabilitas konsentrasi ketiga parameter kualitas udara pada episode kebakaran hutan (Februari-Maret dan Agustus-Oktober). Lonjakan konsentrasi tertinggi dijumpai pada Februari-Maret 2005 di mana ketiga parameter menunjukkan kenaikan yang signifikan. Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa tren konsentrasi O₃ sedikit berbeda dengan konsentrasi CO dan PM₁₀. Konsentrasi CO dan PM₁₀ cenderung memiliki variasi yang sama karena kedua parameter ini merupakan produk primer dari hasil pembakaran biomassa. Berbeda dengan O₃, gas ini merupakan produk sekunder yang dihasilkan dari hasil reaksi prekursor-prekursornya dengan bantuan energi radiasi matahari (lihat Gambar 1). Klausen *et al.* (2008) mengindikasikan bahwa produksi O₃ di Bukit Kototabang dominan terjadi di siang hari dan proses deposisinya terjadi pada malam hari. Energi radiasi matahari menjadi syarat yang vital untuk produksi ozon di troposfer. Meskipun konsentrasi CO di troposfer tidak begitu signifikan, seperti yang terjadi pada bulan Februari 2007, jika kondisi di atmosfer memungkinkan dan ketersediaan prekursor-prekursor lain seperti NO₂ dan CH₄ cukup besar, produksi ozon akan terjadi dengan jumlah yang signifikan.

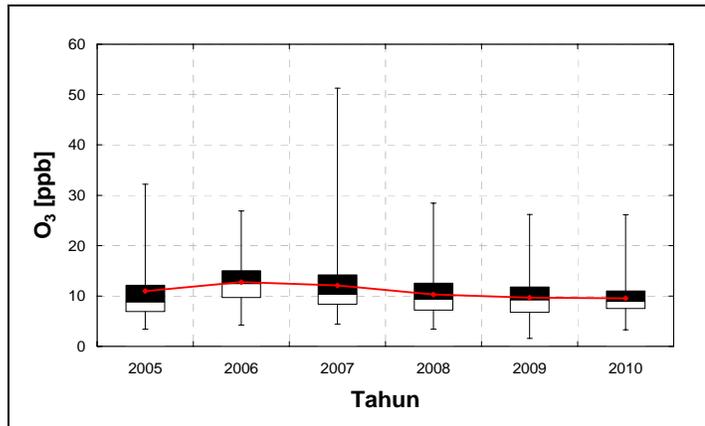
- Ozon Permukaan (O₃)
- Konsentrasi rata-rata bulanan O₃ di Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Konsentrasi rata-rata bulanan O₃ di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Konsentrasi rata-rata bulanan O_3 tertinggi terjadi pada bulan Februari, namun dengan rentang data yang sangat besar. Hal ini disebabkan pada bulan tersebut terjadinya kebakaran hutan yang menyebabkan konsentrasi O_3 meningkat signifikan, terutama pada tahun 2005-2007. Namun pada tahun-tahun selanjutnya, kenaikan yang terjadi tidak sebesar periode tersebut. Sebagian besar konsentrasi yang terukur berada dikisaran 10-20 ppb dengan nilai rata-rata bulanan yang terukur berada di atas nilai mediannya. Nilai rata-rata tertinggi di bulan Februari, sedangkan yang terendah di bulan April. Bulan Juni memiliki rentang data terendah, karena pada bulan ini jumlah curah hujan yang terukur relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bulan-bulan lain pada periode kering. Selain itu, pada bulan ini juga, jumlah titik api di Pulau Sumatra tidak terlalu banyak. Konsentrasi rata-rata bulanan O_3 berkisar antara 8.92-14.85 ppb.

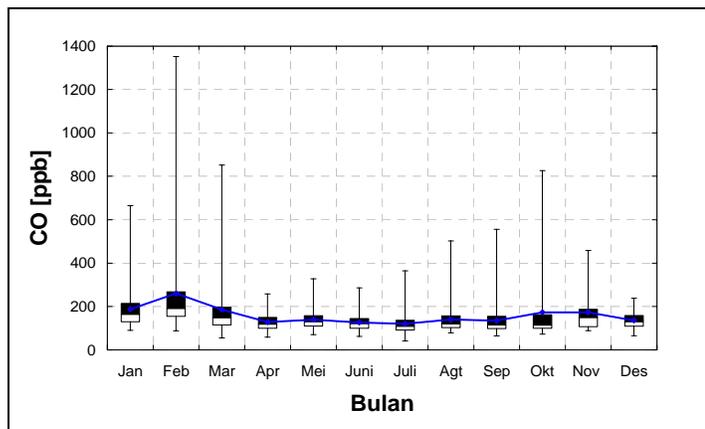
Konsentrasi rata-rata tahunan O_3 yang terukur di Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 6 di bawah. Peningkatan O_3 yang signifikan di bulan Februari 2007 menyebabkan rentang data pada bulan tersebut besar. Seperti halnya rata-rata bulanan, semua nilai rata-rata tahunan O_3 juga berada di atas nilai mediannya. Hal yang menarik dari rata-rata tahunan adalah pada tahun 2006. Konsentrasi O_3 pada tahun ini memiliki rentang yang paling rendah, tetapi nilai rata-ratanya merupakan yang tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa hampir sepanjang tahun tersebut, konsentrasi O_3 harian yang terukur cenderung lebih tinggi dari tahun-tahun lainnya. Untuk konsentrasi rata-rata terendah terukur pada tahun 2010. Konsentrasi rata-rata tahunan O_3 berkisar antara 9.55-12.76 ppb.



Gambar 6. Konsentrasi rata-rata tahunan O_3 di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

▪ Karbon Monoksida (CO)

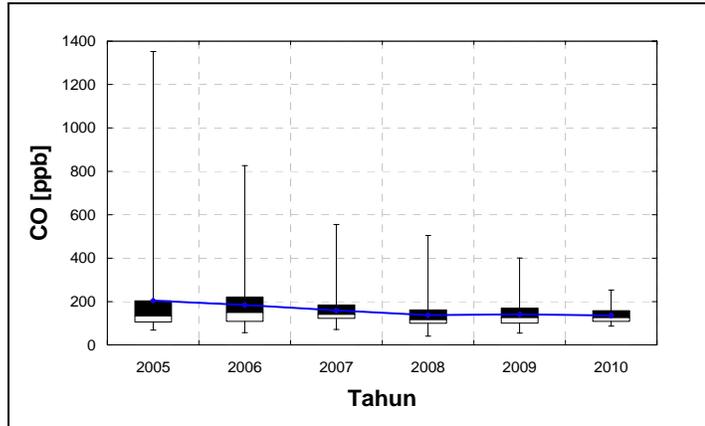
Konsentrasi rata-rata bulanan CO di Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 7 berikut:



Gambar 7. Konsentrasi rata-rata bulanan CO di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Tren konsentrasi rata-rata bulanan CO hampir sama dengan konsentrasi O_3 . Bulan-bulan di mana banyak terdapat titik api memiliki rentang dan rata-rata yang lebih besar dibandingkan bulan-bulan lainnya. Bulan Februari memiliki nilai maksimum tertinggi karena konsentrasi

maksimum harian CO pada bulan tersebut mencapai lebih dari 1300 ppb. Konsentrasi rata-rata bulanan CO berkisar antara 120.11-259.57 ppb. Sementara itu, untuk konsentrasi rata-rata tahunan CO di Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 8.

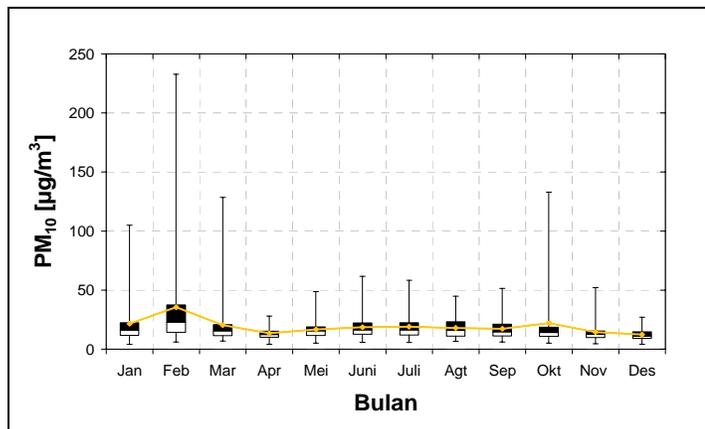


Gambar 8. Konsentrasi rata-rata tahunan CO di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Berbeda dengan konsentrasi O₃, konsentrasi CO di tahun 2005 memiliki rentang data terbesar. Selain itu, pada tahun ini pula konsentrasi rata-rata CO berada di atas kuartil 3. Hal ini disebabkan konsentrasi CO pada tiga bulan pertama di tahun ini yang sangat tinggi. Konsentrasi rata-rata tahunan CO berada di kisaran 135.60-204.38 ppb.

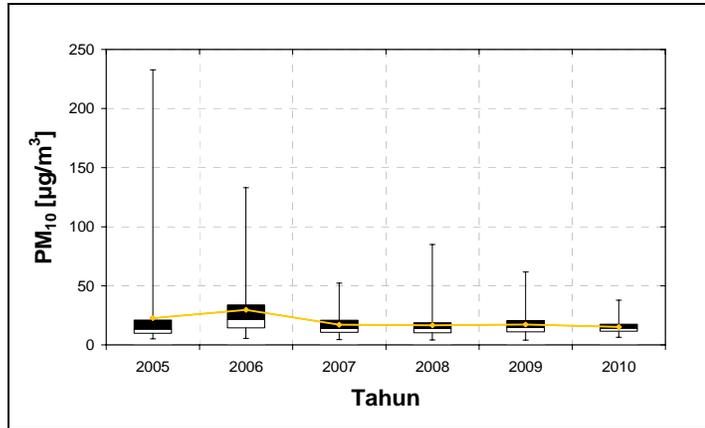
▪ Aerosol PM₁₀

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, tren konsentrasi aerosol PM₁₀ memiliki kemiripan dengan konsentrasi CO. Tren tersebut diperlihatkan pada Gambar 9 berikut. Bulan Februari dan Oktober memiliki rentang data terbesar dan sedangkan rentang terkecil terjadi di bulan Desember. Konsentrasi rata-rata bulanan aerosol PM₁₀ berada di kisaran 12.37-35.50 µg/m³.



Gambar 9. Konsentrasi rata-rata bulanan aerosol PM₁₀ di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Konsentrasi rata-rata tahunan aerosol PM₁₀ di Bukit Kototabang diperlihatkan pada Gambar 10 berikut.

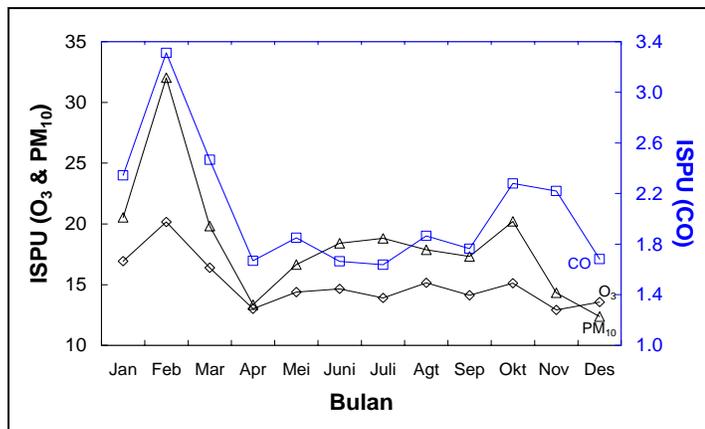


Gambar 10. Konsentrasi rata-rata tahunan aerosol PM₁₀ di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Hampir sama dengan konsentrasi CO, tahun 2005 merupakan tahun yang memiliki rentang data konsentrasi aerosol PM₁₀ terbesar. Perbedaan antara kedua parameter ini terlihat pada tahun 2007 di mana untuk aerosol PM₁₀, rentang datanya jauh lebih kecil daripada CO. Perbedaan ini disebabkan oleh jumlah curah hujan pada tahun 2007 lebih banyak daripada tahun 2005. Jumlah curah hujan yang lebih banyak mengakibatkan jumlah aerosol PM₁₀ yang terdeposisi di permukaan bumi lebih banyak sehingga konsentrasi yang terukur menjadi lebih rendah. Konsentrasi rata-rata tahunan aerosol PM₁₀ tertinggi di tahun 2006, sementara rentang data pada periode 2005-2010 berkisar antara 15.15-29.64 µg/m³.

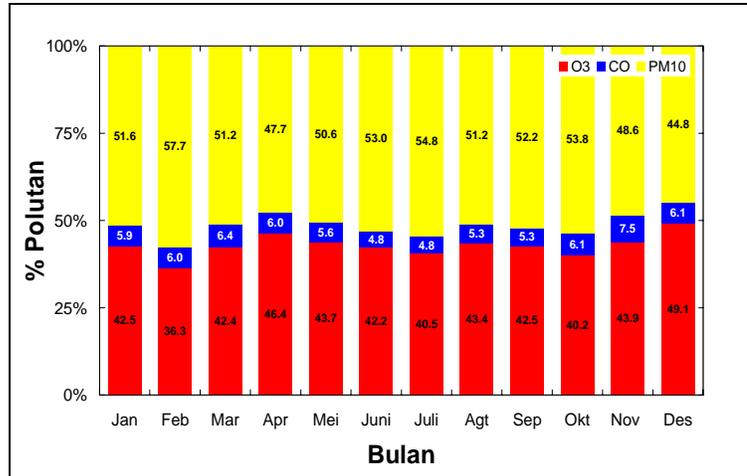
Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

Variasi bulanan ISPU di Bukit Kototabang untuk periode 2005-2010 diperlihatkan pada Gambar 11.



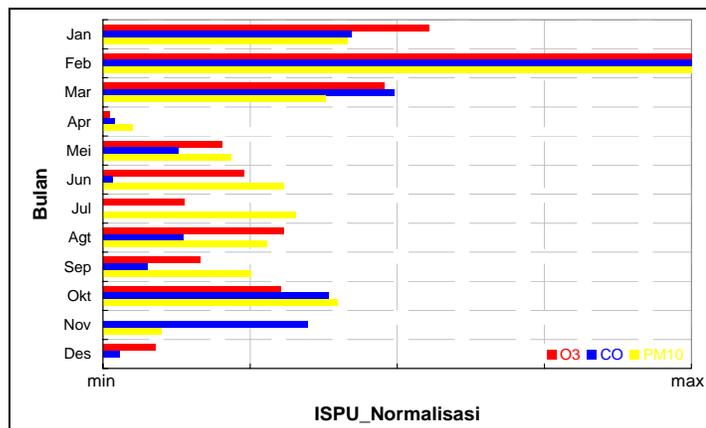
Gambar 11. Variasi nilai ISPU rata-rata bulanan O₃ dan PM₁₀ (garis hitam), serta CO (garis biru) di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Sejalan dengan yang ditunjukkan dari hasil pengukuran konsentrasi parameter kualitas udara, bulan Februari merupakan bulan yang memiliki nilai ISPU tertinggi, yang mengindikasikan bahwa pada bulan ini, konsentrasi semua parameter kualitas udara mencapai nilai tertinggi. Dari gambar tersebut juga dapat terlihat bahwa untuk CO dan PM₁₀, nilai ISPU pada bulan Oktober juga mengalami kenaikan. Sementara itu, tren nilai ISPU untuk O₃ setelah mengalami kenaikan di bulan Februari, nilainya cenderung stabil pada ± 14. Untuk mengetahui parameter mana yang memberikan kontribusi paling besar pada nilai ISPU per bulan dapat dilihat pada Gambar 12 berikut.



Gambar 12. Prosentase kontribusi polutan dari tiga parameter kualitas udara di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

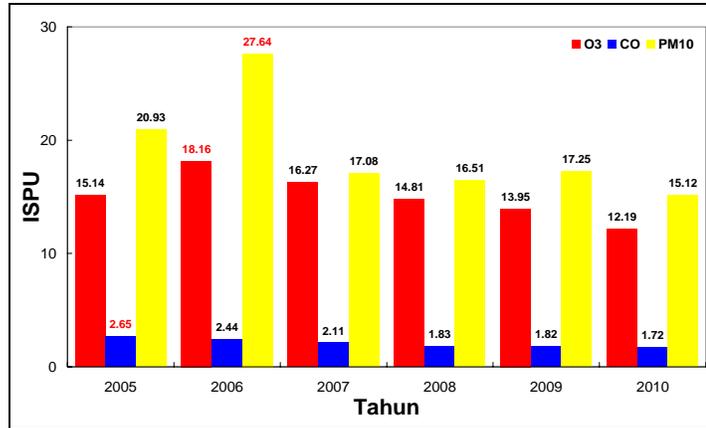
Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa parameter yang paling dominan sebagai polutan adalah aerosol PM₁₀, kemudian diikuti oleh O₃ dan CO. Nilai CO jauh lebih rendah daripada dua parameter lainnya dan prosentase yang paling signifikan pada bulan November. Dari gambar tersebut juga diketahui bahwa hanya pada bulan Desember saja aerosol PM₁₀ tidak menjadi parameter dominan karena pada bulan tersebut O₃ memberikan kontribusi yang lebih besar. Penyebab dari kondisi ini dapat dijelaskan dari Gambar 13 berikut.



Gambar 13. Nilai ISPU ternormalisasi bulanan di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Jika dibedakan berdasarkan pola hujan di Bukit Kototabang, tren yang menarik diperlihatkan oleh Gambar 13 di atas. Pada bulan-bulan basah - dengan pengecualian Februari dan Oktober di mana episode kebakaran hutan berpengaruh signifikan pada kualitas udara - dapat dilihat bahwa nilai ISPU parameter gas (O₃ dan CO) cenderung lebih tinggi daripada aerosol. Tren sebaliknya diperlihatkan pada bulan-bulan kering di mana konsentrasi aerosol PM₁₀ lebih tinggi dibandingkan kedua gas. Adanya curah hujan yang tinggi menyebabkan terjadinya koagulasi aerosol dengan air hujan sehingga terdeposisi ke permukaan bumi. Proses koagulasi ini dikenal dengan proses *washout* (Jacobson, 2003). Dari Gambar 14 juga dapat dilihat bahwa tiap parameter kualitas udara mencapai nilai maksimum pada bulan yang berbeda. O₃ pada bulan November, CO pada bulan Juli, dan aerosol PM₁₀ di bulan Desember. Berdasarkan gambar di atas pula dapat diketahui bahwa bulan April merupakan bulan yang paling 'bersih' karena nilai ISPU ketiga parameter berada keadaan mendekati minimum.

Nilai ISPU tahunan ketiga parameter kualitas udara di Bukit Kototabang dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Nilai ISPU rerata tahunan di Bukit Kototabang periode 2005-2010.

Pada tahun 2006, dua parameter kualitas udara, yaitu O₃ dan aerosol PM₁₀ mencapai nilai ISPU tertinggi, sedangkan nilai ISPU CO tertinggi diperoleh pada tahun 2005. Dari data-data konsentrasi ketiga parameter yang telah dibahas sebelumnya memang menunjukkan bahwa kedua tahun ini ditandai dengan lonjakan konsentrasi ketiga parameter akibat adanya jumlah titik api di Pulau Sumatra. Sementara itu, khusus untuk O₃, nilai ISPU pada tahun 2007 memiliki nilai yang cukup besar karena adanya tingginya konsentrasi O₃ pada bulan Februari di tahun tersebut.

Kondisi kualitas udara Bukit Kototabang periode 2005-2010 berdasarkan data harian menurut kategori ISPU dapat diklasifikasi sebagai berikut:

Tabel 4. Kategorisasi kondisi kualitas udara di Bukit Kototabang berdasarkan data harian tiga parameter kualitas udara periode 2005-2010.

Kategori	Skala	%		
		O ₃	CO	PM ₁₀
Baik	0-50	99.9	100	96.58
Sedang	51-100	0.05	0	3.20
Tidak Sehat	101-199	0.05	0	0.22
Sangat Tidak Sehat	200-299	0	0	0
Berbahaya	>299	0	0	0

Dari Tabel 4 tersebut dapat dilihat bahwa selama periode 2005-2010, kondisi kualitas udara di Bukit Kototabang masih tergolong baik. Meskipun dengan berbagai perubahan kondisi atau adanya kejadian kebakaran hutan di sekitar Pulau Sumatera, hasil perhitungan menunjukkan lebih dari 95% data berada pada kategori baik. Kondisi kualitas udara yang mencapai kategori ‘Tidak Sehat’ nilai sangat kecil dan muncul pada saat jumlah titik api yang sangat banyak dan trayektori angin yang membawa polutan mengarah ke Bukit Kototabang.

KESIMPULAN

Kondisi kualitas udara di Bukit Kototabang yang ditinjau dari tiga parameter kualitas udara pada periode 2005-2010 dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut adalah intensitas curah hujan, jumlah titik api, dan trayektori angin. Dari ketiga faktor tersebut diperoleh temuan bahwa pada bulan Februari, intensitas curah hujan yang sedang, jumlah titik api yang banyak, dan trayektori angin yang membawa polutan dominan mengarah ke Bukit Kototabang menyebabkan konsentrasi ketiga parameter mencapai nilai maksimumnya. Namun demikian, berdasarkan nilai ISPU, kondisi kualitas udara di Bukit Kototabang masih dalam keadaan yang baik, di mana kurang dari 4% data yang menunjukkan kualitas udara berada pada keadaan sedang atau tidak sehat. Aerosol PM₁₀ merupakan parameter kualitas udara utama yang menentukan kualitas udara di Bukit Kototabang karena parameter ini memberikan nilai ISPU yang paling besar dan dominan dibandingkan dengan dua parameter lainnya, yaitu berkisar antara 12-32. Parameter ini sangat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan dimana pada bulan-bulan basah, nilainya lebih rendah daripada parameter gas karena adanya proses *washout*.

DAFTAR PUSTAKA

- ADORC. 2006. *Tropospheric Ozone: A Growing Threat*. Prime Station Corp., Niigata, Japan.
- Andreae, M. O., and P. Merlet. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles* 15(4): 955-966.
- BAPPENAS-ADB. 1999. *Causes, Extent, Impacts and Costs of 1997/1998 Fires and Drought*. National Development Planning Agency (BAPPENAS) and Asian Development Bank, Jakarta.
- Chameides, W. L., H. Yu, S.C. Liu, M. Bergin, X. Zhou, L. Mearns, G. Wang, C.S. Kiang, R.D. Saylor, C. Luo, Y. Huang, A. Steiner, F. Giorgi. 1999. Case Study of The Effects of Atmospheric Aerosols and Regional Haze on Agriculture: An Opportunity to Enhance Crop Yields in China Through Emission Control. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96: 13626-13633.
- Chavelier, A., F. Gheusi, R. Delmas, C. Ordóñez, C. Sarrat, R. Zbinden, V. Thouret, G. Athier, and J.M. Cousin. 2007. Influence of The Altitude on Ozone Levels and Variability in the Lower Troposphere: A Ground-Based Study for Western Europe over The Period 2001-2004. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 7: 1327-1356.
- Glover, D. 2001. The Indonesian Fires and Haze of 1997: The Economic Toll. In: P. Eaton and M. Radojevic (Eds.) *Forest Fires and Regional Haze in Southeast Asia*. Nova Science Publishers, New York.
- Holloway, T., H. Levy II, and P. Kasibhatla. 2000. Global Distribution of Carbon Monoxide. *J. Geophys. Res.* 105: 12123-12147.
- Ilahi, A.F. 2010. Efek Angin terhadap Konsentrasi Polutan Terukur Karbon Monoksida di Bukit Kototabang: Studi Kasus Tanggal 7-24 Pebruari 2010. *Megasains* 1(4): 239-249.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to The Third Assessment Report of The Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge Univ. Pres, New York.
- Jacobson, M.Z. 2003. Development of Mixed-Phase Clouds from Multiple Aerosol Size Distributions and The Effects of The Clouds on Aerosol Removal. *J. Geophys. Res.* 108(D8), 4245.
- Klausen, J. C. Zellweger, B. Buchmann, and P. Hofer. 2003. Uncertainty and Bias of Surface Ozone Measurements at Selected Global Atmosphere Watch Sites. *J. Geophys. Res.* 108(D19), 4622.
- Klausen, J. C. Zellweger, S. Henne, A.F. Ilahi, C. Siregar, Herizal, M. Mimouni, M.S. Ferroudj, J.M. Kariuki, J.O. Aseyo, and B. Buchman. 2008. *Global Atmosphere Watch Activities at Empa*. NOAA ESRL Annual Meeting, Boulder, Colorado.
- Lawrence, M.G. and J. Lelieveld. 2010. Atmospheric Pollutant Outflow form Southern Asia: A Review. *Atmos. Chem. Phys.* 10: 11017-11096.
- Marenco, A., H. Gouget, P. Nedelec, J.P. Pages, and R. Karcher. 1994. Evidence of A Long-term Increase in Tropospheric Ozone from Pic du Midi Data Series: Consequences: Positive Radiative Forcing. *J. Geophys. Res.* 99: 16617-16632.
- Nugroho, S. 2010. Verifikasi Data Meteorologi Hasil Luaran Model TAPM di SPAG Bukit Kototabang. *Megasains* 1(3): 167-179.
- Olivier, J.G.J., J.A.V. Aardenne, F. Dentener, L. Ganzeveld, and J. Peters. 2005. Recent Trends in Global Greenhouse Gas Emissions: Regional Trends and Spatial Distribution of Key Sources. In: van Amstel (Editor) *Non-CO2 Greenhouse Gases (NCGG-4)*. Millpress, Rotterdam.
- Oltmans, S.J., A.S. Lefohn, J.M. Harrisa, I. Galbally, H.E. Scheel, G. Bodeker, E. Brunke, H. Claude, D. Tarasick, B.J. Johnson, P. Simmonds, D. Shadwick, K. Anlauf, K. Hayden, F. Schmidlin, T. Fujimoto, K. Akagi, C. Meyer, S. Nichol, J. Davies, A. Redondas, E. Cuevas. 2006. Long-term Changes in Tropospheric Ozone. *Atmospheric Environment* 40: 3156-3173.

Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kajii, V.M. Potemkin, and T.V. Khodzher. 2003. Regional Background Ozone and Carbon Monoxide Variations in Remote Siberia/East Asia. *J. Geophys. Res.* 108(D1), 4028.

Staehelin, J., J. Thudium, R. Buehler, A. Volz-Thomas, W. Graber. 1994. Trends in Surface Ozone Concentrations at Arosa (Switzerland). *Atmospheric Environment* 28: 75–87.

SIMULASI ANGIN FOHN DI SEBELAH TIMUR BUKIT BARISAN SUMATERA UTARA MENGGUNAKAN MODEL CUACA NUMERIK WRF-ARW Studi Kasus 12 Agustus 2005

*Dian Mayangwulan**, Alif Adiyasa, Riza Arian Noor,
Sevti Viqa Haiyqa, dan Karin Nadira

ABSTRACT

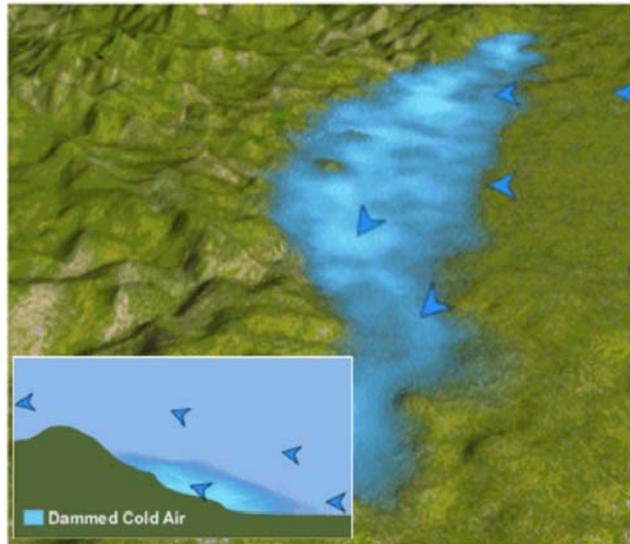
Foehn wind or locally known as "Angin Bohorok", is southwest-westerly wind with low humidity occurred in Medan. This type of wind brings hot and dry air to the area. Bukit Barisan, which is located on west of Medan, is believed to give influence of this wind occurrence. By analyzing some meteorological parameters such as temperature, humidity, wind speed and direction, the present of this wind can be detected. From data recorded in Polonia on 12 August 2005, some meteorological parameters indicated the present of foehn wind. Air temperature was recorded at 36°C; relative humidity was as low as 33%, while wind was gusting from southwest-westerly with maximum speed at 20 knot. Simulation of this phenomena was arranged by using numerical weather prediction model WRF-ARW (Weather Research Forecasting – Advanced Research WRF). Results showed that qualitatively, model could describe the process of foehn wind by simulating heat prolongation that was coming from Bukit Barisan, increasing of wind speed and decreasing of humidity. Quantitative verification yielded strong correlation ($r = 0.85$) with RMSE at 2.83 for temperature. Meanwhile, for humidity, correlation coefficient is 0.59 with RMSE at 20.83. Model could not describe the dominant wind speed and direction.

Keywords: *Angin Bohorok, temperature, humidity, wind speed and direction, WRF-ARW*

PENDAHULUAN

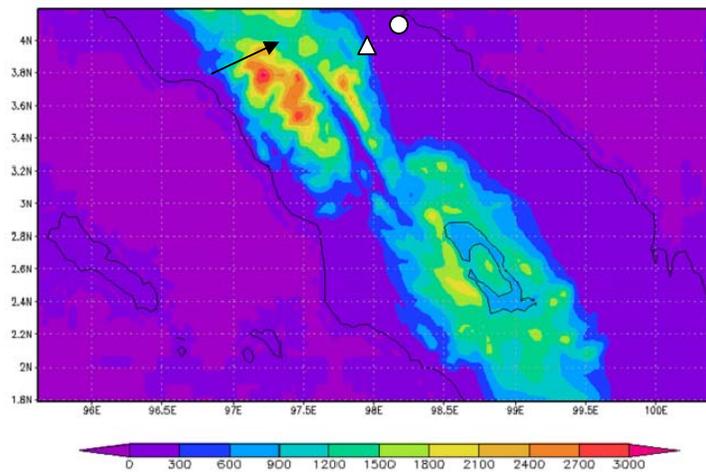
Angin fohn pada umumnya diamati di sisi belakang gunung dari arah datangnya angin dengan bentangan atau tinggi gunung yang cukup untuk memaksa angin naik melewati puncak gunung dan menuruni lereng nya pada sisi yang lain. Kejadian ini biasanya disertai dengan kenaikan temperatur dan menurunnya kelembaban akibat pemanasan secara adiabat pada sisi yang lain (lee side) karena gerakan angin menuruni lereng (Gaffin 2007). Angin fohn mempunyai nama yang berbeda beda pada tiap daerah, bergantung pada darimana angin tersebut berasal (Sellico 2003). Di Eropa tengah angin ini dinamai angin "chinook" yang diakibatkan oleh lereng timur pegunungan Rocky, di Indonesia sendiri ada angin Gending, angin Bahorok, dll. Intensitas dan frekuensi angin fohn sendiri bergantung pada kondisi topografi dan sirkulasi atmosfer skala lokal pada daerah tersebut (Sellico 2003). Meskipun angin fohn telah diketahui menghasilkan temperatur yang lebih panas dan angin kering yang menuruni lereng akan tetapi pen definisian angin ini sendiri masih sulit, karena temperatur dan kelembaban bukan merupakan suatu kriteria yang mutlak karena kedua hal tersebut bergantung pada keadaan sebelum dan sesudah angin fohn (Brinkmann 19971). Perbedaan temperatur pada saat terjadi angin fohn juga berbeda beda, bergantung pada banyak faktor termasuk juga karakteristik massa udara, ketinggian gunung atau bukit, jumlah perawanan, dan jenis tanah (Vergeiner et al. 2002). Fenomena angin fohn sendiri masih belum banyak dikaji di Indonesia, sehingga efek dan intensitasnya masih belum terukur secara ilmiah.

Wilayah topografi Sumatera yang heterogen menyebabkan fenomena cuaca yang terjadi secara lokal bervariasi dan berbeda untuk masing masing tempat. Bukit barisan yang terletak di sebelah barat stasiun Meteorologi Polonia membentang dari arah selatan kearah utara hampir sejajar dengan tepi pantai bagian baratnya, dengan ketinggian mencapai 1500 - 3000m dan kemiringan lereng yang landai disebelah timur nya.

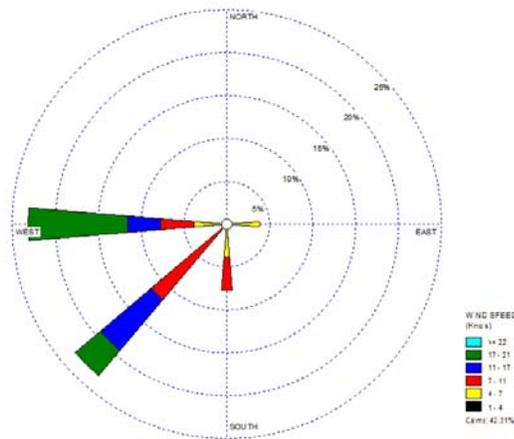


Gambar 1. Angin yang tidak dapat melewati gunung akan mengalir disekitar lereng mencari tekanan yang lebih rendah. Windslope terjadi karena angin berhasil melewati puncak bukit (insert).

Wilayah topografi Sumatera yang heterogen menyebabkan fenomena cuaca yang terjadi secara lokal bervariasi dan berbeda untuk masing-masing tempat. Bukit barisan yang terletak di sebelah barat stasiun Meteorologi Polonia membentang dari arah selatan ke arah utara hampir sejajar dengan tepi pantai bagian baratnya, dengan ketinggian mencapai 1500 - 3000m dan kemiringan lereng yang landai disebelah timurnya.

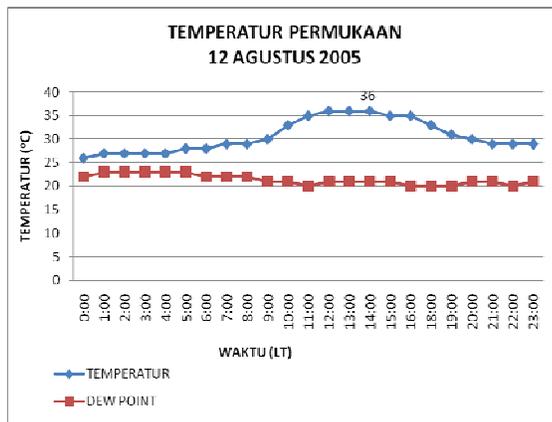


Gambar 2. Ketinggian Topografi (m) yang didapat dari plotting hgt (height) dari model WRF. Bukit Barisan (tanda panah) dengan ketinggian mencapai 3000m berada di sebelah barat Medan (lingkaran) sedangkan Bohorok berada kaki bukit bagian timur (segitiga). Pada saat angin baratan berhembus melintasi wilayah perbukitan tersebut, maka angin yang telah melewati puncak bukit akan bergerak menuruni lereng disebelah timur dan melintasi daerah yang bernama Bohorok, karenanya angin fohn ini dinamakan Angin Bohorok. Intensitas dan frekuensi angin Bahorok sendiri tidak jelas dan tidak menentu.

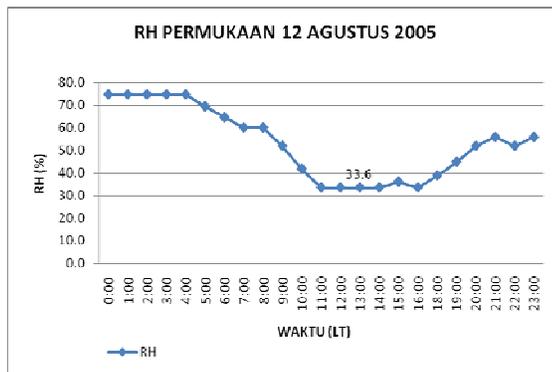


Gambar 3. Mawar Angin permukaan (10m) stasiun Meteorologi Polonia 11-12 Agustus 2005, jam 19.00- 19.00 LT. Keberadaan angin fohn ditandai dengan adanya kecepatan angin maksimum 20 kt dari arah Barat dan Barat Daya (warna hijau).

Pada bulan Agustus 2005, tepatnya pada tanggal 12 tercatat data pengamatan permukaan bahwa terjadi kecepatan angin maksimum sebesar 21 kt dari arah Tenggara dan Barat, hembusan angin tersebut disertai juga dengan kenaikan temperatur permukaan hingga mencapai 36°C (Gambar 3 dan 4).



Gambar 4. Temperatur Permukaan Stasiun Meteorologi Polonia 12 Agustus 2005. Kenaikan temperatur disertai dengan RH (Gambar 5) yang kering diidentifikasi bertepatan dengan adanya angin barat daya dan angin baratan.



Gambar 5. RH permukaan yang kering dikarenakan udara dingin terdorong atau digantikan oleh udara panas yang di bawa angin fohn.

Tulisan ini bertujuan untuk melakukan simulasi angin fohn tersebut dengan model cuaca numerik WRF, dengan asumsi bahwa keberadaan angin fohn dapat ditunjukkan oleh adanya arah dan kecepatan angin yang cukup besar dari arah barat daya – barat dan kenaikan temperatur dan bersifat kering pada stasiun Meteorologi Polonia.

METODE PENELITIAN

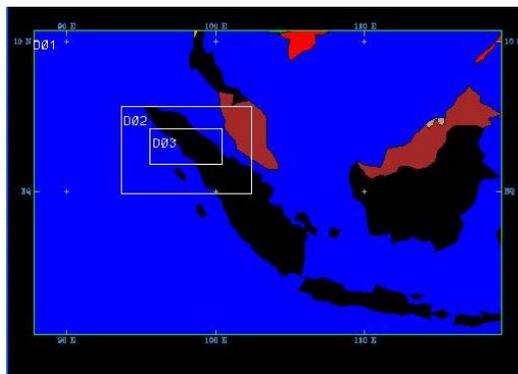
Simulasi angin fohn menggunakan data *final analysis* dari NCEP (*National Centers for Enviromental Prediction*) dengan resolusi 10 x 10 tiap 3 jam dari tanggal 11 Agustus 2005 jam 12.00UTC hingga 12 Agustus 2005 jam 12.00UTC, selanjutnya dilakukan downscaling menggunakan model cuaca numerik skala meso WRF-ARW (*Weather Research and Forecasting- Advanced Research WRF*). Wilayah simulasi disekitar Sumatera Utara dengan resolusi spasial 3 km dan resolusi temporal 180 detik. Data hasil simulasi diekstrak tiap satu jam.

Pengaturan skema parameterisasi perlu dilakukan agar model dapat meng-emulasi-kan proses-proses dalam skala sub-grid dengan baik. Parmeterisasi mikrofisika awan-hujan menggunakan skema WSM-6 (*WRF Single-Moment 6-Class*), skema ini cocok untuk simulasi dengan resolusi tinggi (Hong et al.,2006). Parameterisasi konvektif menggggunakan skema *Greel Devenyi Scheme*. Parameterisasi lapisan batas planeter menggunakan skema MYNN3 (Mellor-Yamada Nakanishi and Nino level 3), skema menghasilkan medan adveksi TKE (*Turbulence Kinetic Energy*) yang halus.

Tabel 1. Pengaturan domain simulasi (mp = parameterisasi mikrofisis awan – hujan, cu = parameterisasi konvektif, pbl = parameterisasi lapisan batas planeter)

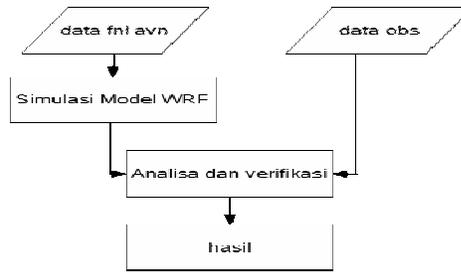
PENGATURAN	DOMAIN 1	DOMAIN 2	DOMAIN 3
resolusi	27 km	9 km	3 km
grid	130 x 8 x 28	109 x 79 x 28	181 x 91 x 28
mp	WSM-3	WSM-4	WSM-6
cu	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Greel Devenyi
pbl	Yonsei University	Yonsei University	MYNN3

Interaksi aliran udara dengan topografi perbukitan ditentukan oleh tinggi bukit dan kecepatan aliran udara sebelum menaiki bukit, Hal ini berkaitan dengan energi potensial gravitasi dalam hal ini stabilitas statis pada puncak bukit dan energi kinetik yang dimiliki aliran udara sebelum menaiki bukit.



Gambar 6. Domain simulasi, domain yang digunakan untuk simulasi adalah domain 3 (D03)

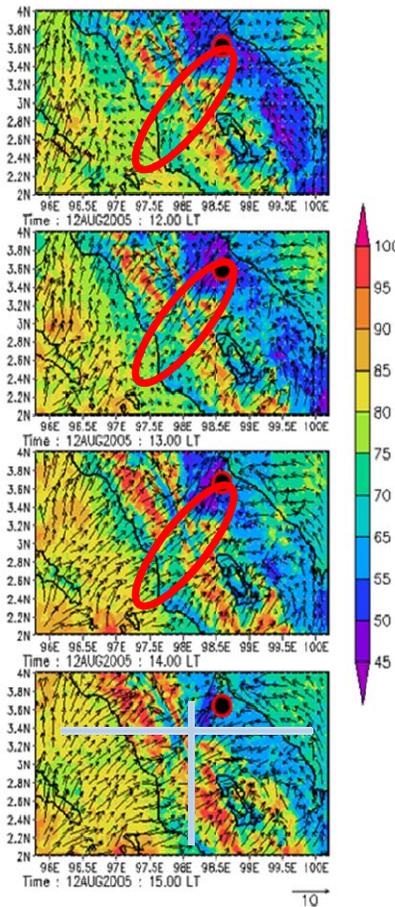
Identifikasi aliran udara yang melewati puncak pegunungan dilihat dari plot angin pada lapisan bawah secara lateral maupun secara vertikal, selanjutnya dilihat perubahan temperatur udara, temperatur potensial dan kelembaban udara pada aliran udara sisi upslope dan sisi *downslope*. Hasil output model diverifikasi pada titik stasiun pengamatan Polonia Medan untuk variabel temperatur, arah dan kecepatan angin, RH pada lapisan permukaan dan komponen angin zonal dan meridional pada level permukaan.



Gambar 7. Diagram alir metode penelitian.

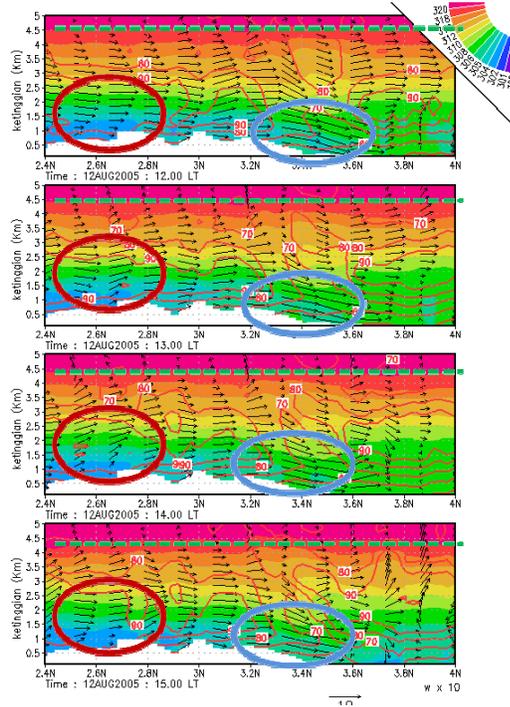
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil output WRF (Gambar 8) menunjukkan aktifitas angin fohn mulai terlihat pada 12 Agustus 2005 12.00LT hingga 15.00LT, terdapat aliran udara permukaan berasal dari Baratdaya mengalir melintasi Bukit Barisan memperkuat angin gunung, dengan kecepatan aliran pada sisi *upslope* sekitar 5-10m/s, dan pada sisi *downslope* sekitar 9-12m/s. Kelembaban udara pada sisi *upslope* 70%-80%, sedangkan pada sisi *downslope* kelembaban udara 70%-50%. Identifikasi angin fohn yang dilakukan berdasarkan pada terjadinya peningkatan kecepatan angin dan arah yang berasal dari barat laut Bukit Barisan disertai penurunan kelembaban udara secara signifikan sehingga angin fohn bersifat kering.



Gambar 8. Streamline dan kontur gradasi *relative humidity*. Terdapat aliran yang melintasi bukit (elips) disertai dengan menurunnya RH setelah melewati bukit. Garis putih vertikal dan horizontal (gambar paling bawah) merupakan letak perpotongan vertikal untuk Gambar 9.

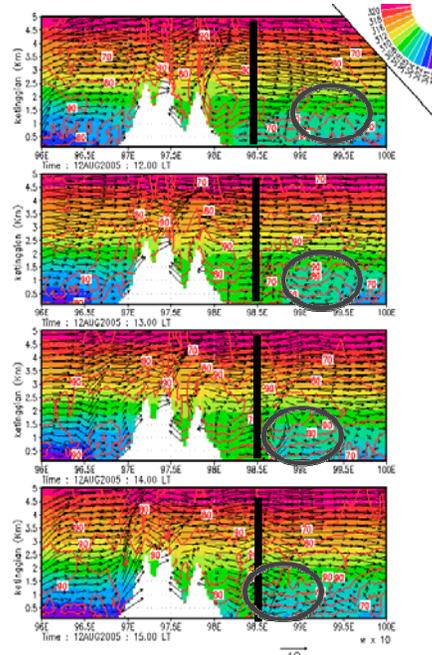
Garis putih menunjukkan penampang vertikal arah kecepatan angin, temperatur potensial, dan *Relative Humidity* untuk mengidentifikasi profil vertikal ketika terjadi angin fohn.



Gambar 9. Penampang vertikal arah meridional, tanda panah menandakan arah dan kecepatan angin ditandai dengan panjangnya. Kontur gradasi berisi data Temperatur Potensial (θ), sedangkan kontur garis merupakan kontur kelembaban. Garis hitam vertikal adalah posisi lintang kota Medan.

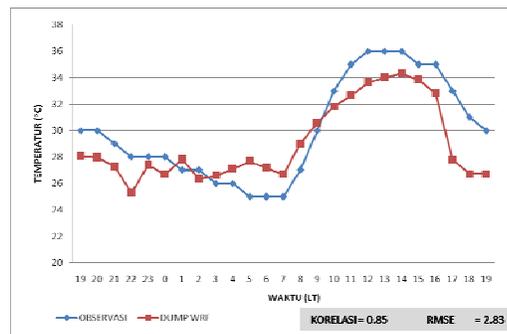
Penampang vertikal meridional menunjukkan adanya aliran dari selatan dengan kecepatan sekitar 10m/s, nilai temperatur potensial sekitar 302K dengan ketebalan vertikal sekitar 3.5km pada sisi upslope aliran terlihat mengalami gesekan permukaan (lingkaran merah) hingga mencapai puncak bukit disertai kenaikan kelembaban dari 70% hingga 90%. Aliran dipercepat ketika menuruni bukit disertai penurunan kelembaban udara dari 90% hingga 60%. Temperatur potensial pada sisi upslope (302K-306K) lebih rendah daripada sisi *downslope* (306K-308K) pada jam 12.00LT-14.00LT.

Critical flow terlihat pada ketinggian 4.5 km (garis putus-putus hijau pada Gambar 8). Angin fohn mencapai kecepatan sekitar 12m/s diperlihatkan lingkaran biru. Penampang vertikal zonal lebih menunjukkan adanya turbulensi di lapisan permukaan seperti diperlihatkan lingkaran abu-abu (Gambar 10) dapat disebabkan karena perbedaan temperatur potensial di daerah tersebut. Hal ini dapat disebabkan karena pertemuan dengan aktifitas angin laut pada siang hari.



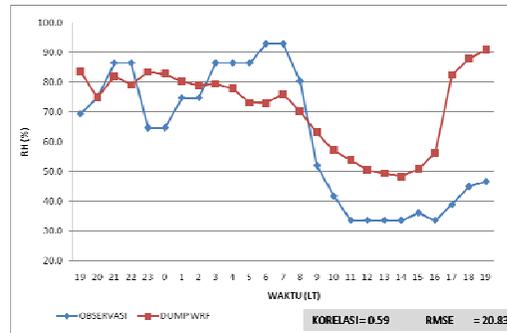
Gambar 10. Penampang vertikal arah zonal, tanda panah menandakan arah dan kecepatan angin ditandai dengan panjangnya. Kontur gradasi berisi data Temperatur Potensial (theta), sedangkan kontur garis merupakan kontur kelembaban. Garis hitam vertikal adalah posisi longitude kota Medan yang terletak tepat di kota Medan.

Sedangkan secara kuantitatif, melalui perbandingan variabel - variabel cuaca yang menandai kejadian angin fohn seperti misalnya Temperatur, RH (Kelembaban), dan Angin, di dapat hasil sebagai berikut:



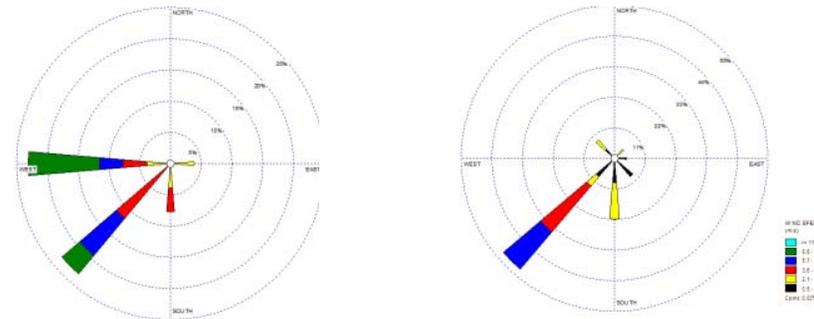
Gambar 11. Perbandingan temperatur udara permukaan observasi dan temperatur udara hasil dump data WRF. Nilai korelasi 0.85 akan tetapi nilai RMSE bernilai cukup besar yaitu 2.83.

Dari grafik perbandingan diatas terlihat pola dari grafik data WRF cukup dapat mengikuti perubahan temperatur seperti yang di tunjukkan oleh grafik data pengamatan, karenanya nilai korelasi yang didapat cukup baik. Akan tetapi error atau selisih antara keduanya masih cukup tinggi sehingga Root Mean Square Error (RMSE) yang dihasilkan bernilai besar. Perbandingan variabel temperatur masih memiliki hasil yang lebih baik bila dibandingkan dengan variabel kelembaban (RH). Variabel RH yang dihasilkan oleh WRF kurang dapat mengikuti pola dari grafik hasil pengamatan.



Gambar 12. Perbandingan RH permukaan observasi dan RH hasil dump data WRF. Nilai korelasi 0.59 akan tetapi nilai RMSE bernilai cukup besar yaitu 20.83.

Pada awal waktu terlihat grafik keluaran WRF memiliki pola yang berkebalikan, dan terlihat pola grafik yang dihasilkan WRF terkadang terlambat atau mendahului penurunan atau kenaikan RH, sehingga nilai error yang dihasilkan sangat besar. Verifikasi yang selanjutnya adalah menggunakan variabel arah dan kecepatan angin permukaan yang ditampilkan dalam bentuk mawar angin (Gambar 13).



Gambar 13. Mawar Angin dengan data observasi (kanan) dan mawar angin dengan data hasil dump WRF (kiri).

Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa mawar angin hasil olahan data WRF juga kurang dapat menggambarkan kejadian angin fohn. Meskipun secara kasar sudah dapat memberikan arah yang benar untuk arah Barat Daya, akan tetapi masih belum dapat menggambarkan untuk arah Barat yang lebih dominan kecepatannya.

KESIMPULAN

Identifikasi angin fohn pada tanggal 12 Agustus 2005 dapat disimulasikan oleh model WRF V.3, artinya hasil run model WRF V.3 dapat memberikan gambaran secara kualitatif dari variabel cuaca yang lain untuk memperkuat terjadinya fenomena angin fohn. Sedangkan secara kuantitatif masih belum dapat memberikan gambaran yang baik mengenai keberadaan angin fohn yang pada studi ini dilakukan verifikasi dengan data di Stamet Polonia.

DAFTAR PUSTAKA

- Grafin, D.M., 2005: Foehn Winds That Produced Large Temperature Difference near the Southern Appalachian Mountains. *Wea. Forecasting* 22: 145-159.
- Hong, S.Y., Lim, J.O.J.; The WRF single moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Kor. Meteo. Society* 42(2): 129-151.
- Ogura, Y., Kumambe, R., Yamamoto, M., 2004: A Foehn Event Enhanced by the Synoptic Scale Dry Intrusion. *J. Met. Sos. Japan* 82(1): 229-240.

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

Seluchi, M.E., 2002: *Analysis of three Situation of Foehn Effect over the Andes (Zonda Wind) Using the Eta-CPTec Regional Model*.

Vergeiner, J., 2004: *South Foehn Study and A new Foehn Classification Scheme in the Wipp and Inn Valley*.

Zangi, G., 2003: *Numerical Simulation of the Foehn in the Rhine Valley on 24 October 1999*.

<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2009/abstracts/P2B-04.pdf>

ABSTRACT

The characteristic of particulate matter 10 (PM₁₀) has been studied during 2009-2010 at BMKG Kemayoran Jakarta. The measurement was done by using Beta-Attenuation Mass Monitor 1020 (BAM 1020) to measure the concentration of PM₁₀ (with diameter less than 10 μm). In this study, PM₁₀, which is distributed fluctuate following the physical or dynamical atmosphere. The calculation result of correlation between the three parameters, PM₁₀, SPM and rainfall has provided confirmation that the characteristics of all three have a strong relationship. Rainfall which is a combination of physical and dynamic atmospheric processes has provided a sizable contribution in determining the properties of PM₁₀ and SPM. Besides acting as radiative properties in the atmosphere, PM₁₀ also seems to be to affect human health, especially on the respiratory system. Therefore, during a dry season, where rainfall intensity decreased significantly, it is needed an early warning information to prevent the dangerous of PM₁₀ impact on human health. For the future we need a mapping of the distribution of the elements of PM₁₀ based on seasonal pattern, especially in Jakarta area in order to support increased public awareness, especially for the health sector.

Keywords: *PM₁₀, BAM 1020, SPM and public awareness.*

PENDAHULUAN

Pencemaran udara yang diakibatkan oleh meningkatnya konsentrasi polutan, hingga saat ini telah menimbulkan masalah yang serius di beberapa wilayah Indonesia. Masalah tersebut diantaranya dapat mengakibatkan gangguan pada kesehatan manusia, pengurangan jarak pandang (*visibility*), penurunan kualitas udara di wilayah perkotaan hingga mempengaruhi kesetimbangan neraca radiasi di atmosfer. Hal ini patut menjadi perhatian bersama, dikarenakan berdasarkan hasil pemantauan dalam beberapa dasawarsa terakhir ini, nilai kualitas udara di beberapa wilayah di Indonesia telah mengalami penurunan yang signifikan. BMKG sebagai lembaga pemerintah non kementerian, saat ini telah melakukan berbagai upaya di dalam mengamati fluktuasi kualitas udara yang terjadi di beberapa wilayah di Indonesia.

Saat ini BMKG memiliki 44 jaringan stasiun pemantau kualitas udara. Dari 44 stasiun tersebut, 40 stasiun melakukan pengamatan SPM (*Suspended Particulate Matter*) dan 30 stasiun selain melakukan pengamatan SPM, juga melakukan pengamatan komposisi kimia atmosfer, termasuk tingkat keasaman dan kimia air hujan.

Khusus di wilayah Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta, kantor pusat BMKG Jakarta telah melakukan pengukuran SPM dan komposisi kimia air hujan. Selain itu juga dilakukan pengukuran beberapa bahan pencemar lain yakni Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂), aerosol dan ozon permukaan.

Berdasarkan definisi dari *United States Environmental Protection Agency* (2007), pencemaran udara adalah kehadiran dari beberapa kontaminan atau substansi polutan di udara yang mempengaruhi kesehatan manusia, atau menghasilkan efek yang berbahaya terhadap lingkungan.

Sedangkan jika mengacu pada *Clean Air Act* (1970) yang dibentuk oleh National Ambient, ada enam jenis dari bahan polutan yang memenuhi kualifikasi sebagai bahan pencemar udara, yaitu: Particulate Matter (PM), Ozone (O₃), Karbon Monoksida (CO), Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Plumbum (Pb).

Sebagai salah satu bahan polutan, *Particulate Matter* (PM) adalah partikel yang mengambang di udara atau atmosfer dan dikenal juga sebagai partikel polutan atau sebagai

salah satu penyebab polusi udara. Partikel ini tidak dapat terlihat oleh mata, namun juga sangat membahayakan bagi kesehatan manusia.

PM memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda, dapat berwujud sebagai partikel padat atau cair. PM dapat dibagi ke dalam dua kelompok besar yang dapat dibedakan berdasarkan ukurannya. Untuk ukuran partikel yang relatif lebih besar dikenal sebagai PM_{10} , sedangkan untuk ukuran partikel yang relatif lebih kecil dikenal sebagai $PM_{2.5}$. PM_{10} memiliki ukuran diameter kurang dari 10 mikrometer (μm), sedangkan bagi $PM_{2.5}$ memiliki ukuran diameter kurang dari 2,5 μm .

Pada hakekatnya, ukuran PM bukan satu-satunya tolok ukur di dalam membedakannya. Namun partikel tersebut berasal dari bahan serta asal tempat yang berbeda. PM_{10} dapat berasal dari asap, kotoran dan debu pabrik, lahan pertanian, jalan raya serta benih dan tepung sari tumbuhan. PM_{10} dihasilkan dari proses penghancuran dan pengikisan batuan dan tanah yang selanjutnya ditiup oleh angin. Sedangkan $PM_{2.5}$ berasal dari bahan organik beracun serta logam berat. Partikel jenis ini dihasilkan dari proses pembakaran kendaraan bermotor, pembakaran tanaman dan peleburan logam berat.

Khusus bagi $PM_{2.5}$, partikel ini dapat berada di udara lebih lama dibandingkan PM_{10} serta mampu melayang dan bergerak lebih jauh dikarenakan ukurannya yang sangat kecil. Sebagai gambaran, PM_{10} dapat tinggal di udara dalam interval menit hingga jam, sedangkan $PM_{2.5}$ dapat tinggal di udara dalam interval hari hingga minggu.

Jika dihubungkan dengan masalah kesehatan, keberadaan $PM_{2.5}$ maupun PM_{10} sangat berbahaya bagi sistem pernapasan manusia. $PM_{2.5}$ dapat masuk hingga ke rongga pernafasan yang sempit. Sedangkan pada PM_{10} , disamping dapat melekat pada dinding rongga saluran pernapasan, dapat juga menghambat saluran pernafasan yang lebih sempit hingga menuju ke sistem paru-paru.

Suspended Particular Matter (SPM) adalah partikel yang melayang di udara, dan dalam jumlah akan membahayakan kesehatan manusia. Partikel (debu) dapat bersumber dari berbagai proses alami seperti letusan gunung berapi atau debu tanah yang melayang tertiuip angin. Sedangkan partikel padat yang bersumber dari aktivitas manusia dapat berasal dari proses pembakaran batubara, aktivitas industri dan kendaraan bermotor.

SPM atau partikel padat yang tersuspensi dapat berwujud partikulat padat atau jatuhan (droplet) cair. Adapun jumlah gabungan dari keduanya dinamakan *Total Suspended Particulate*. Berdasarkan studi literatur, 60 hingga 65 persen TSP merupakan partikel yang memiliki diameter kurang dari 60 μm atau dikenal sebagai PM_{10} (*Particulate Matter*).

Debu PM_{10} sangat mudah terhirup dan mampu masuk ke dalam sistem paru-paru dikarenakan ukurannya yang sangat kecil. Sehingga terkadang PM_{10} dikenal sebagai *Respirable Particulate Matter* (RPM).

Metode analisis yang diterapkan di BMKG untuk mengetahui nilai konsentrasi SPM adalah menggunakan metode Gravimetric, dan menggunakan instrument High Volume Sampler dimana pada prinsipnya udara bebas dihisap oleh sebuah motor listrik dan selanjutnya disaring melalui kertas filter yang siap menyaring debu SPM. Perbedaan berat yang dihasilkan pada saat kertas filter sebelum dan sesudah pengukuran sangat menentukan nilai konsentrasi dari SPM.

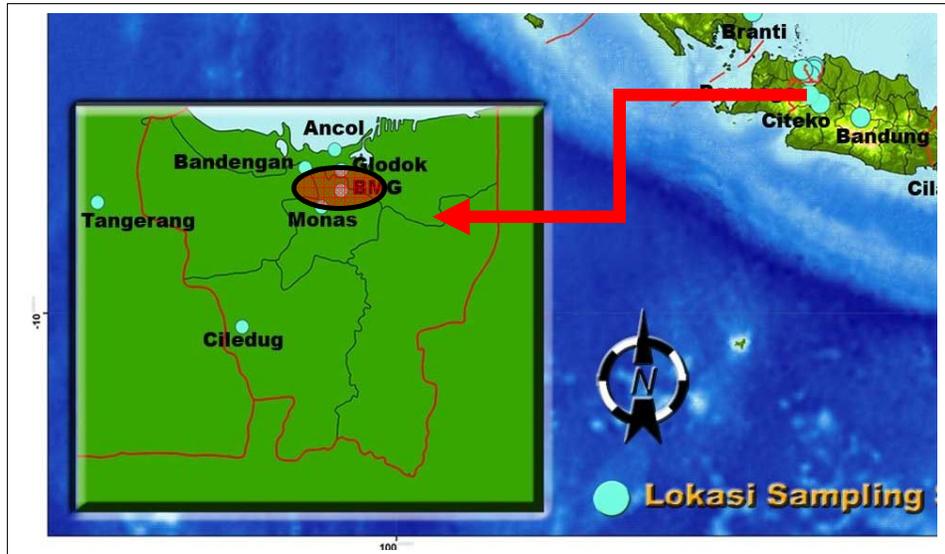
Tulisan ini akan coba membahas tentang karakteristik aerosol PM_{10} yang diamati di wilayah Kemayoran Jakarta. Karakteristik tersebut meliputi pola diurnal, pola bulanan serta kaitannya terhadap unsur-unsur meteorologi, dalam hal ini curah hujan. Periode pengamatan dilakukan antara bulan Januari hingga Mei 2010. Pengamatan dilakukan di wilayah Kemayoran Jakarta yang berada pada posisi 6,165 LS dan 106,866 BT (Gambar 1).

METODE PENELITIAN

Data

Data yang digunakan di dalam studi ini adalah data konsentrasi PM_{10} yang diperoleh melalui instrumen BAM 1020 antara bulan Januari 2009 hingga Juni 2010 di Stasiun 745 Kemayoran. Pemilihan periode pengamatan tersebut sementara ini didasarkan pada ketersediaan data dan untuk melihat karakteristik fisis dari PM_{10} .

Di dalam studi ini akan juga ditampilkan beberapa grafik yang menggambarkan hubungan antara konsentrasi PM₁₀ dengan SPM (*Suspended Particulate Matter*) untuk mengetahui sejauh mana peran keduanya di dalam memantau kondisi kualitas udara di wilayah Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta.



Gambar 1. Lokasi Stasiun Kemayoran Jakarta.

Metode

Beta-Attenuation Mass Monitor 1020

Beta-Attenuation Mass Monitor 1020 atau BAM 1020 yang dipasang di Stasiun 745 Kemayoran, merupakan instrumen yang secara otomatis dapat mengukur serta menyimpan data konsentrasi partikel padat dengan ukuran diameter sampai dengan 10 µm atau dikenal sebagai PM₁₀. Prinsip kerja BAM 1020 adalah dengan memanfaatkan aktivitas peluruhan sinar beta, guna mengetahui konsentrasi massa dari PM₁₀. Unsur C¹⁴ akan memancarkan energi elektron yang cukup tinggi dan dikenal sebagai partikel beta. Partikel beta tersebut selanjutnya dideteksi oleh sebuah detektor yang dikenal dengan sebutan *Ultra Sensitive Scintillation* dan dalam posisi yang saling berdekatan.

BAM 1020 dilengkapi oleh sebuah pompa eksternal yang akan menghisap udara di sekitarnya melalui inlet dan selanjutnya masuk melalui pita filter (*band filter*). Pada pita ini selanjutnya akan dipenuhi oleh partikel-partikel padat yang menyebabkan pelemahan energi radiasi sinar beta. Derajat pelemahan tersebut merupakan representasi untuk menentukan konsentrasi massa dari PM₁₀. Disamping itu pita filter tersebut dapat menentukan konsentrasi volumetrik dari partikel PM₁₀ yang terdapat di udara. Secara teknis, instrumen BAM 1020 terdiri dari tiga buah komponen utama yaitu detektor atau logger, pompa dan inlet. Seluruh komponen dipasang menyatu dan terhubung baik secara mekanis dan otomatis.

Pada proses sampling yang dilakukan oleh BAM 1020, jumlah partikel beta yang diserap oleh partikel, seperti debu yang terdapat pada pita filter akan berkurang secara eksponensial terhadap massanya. Persamaan (1) menunjukkan hubungan antara intensitas sinar beta baik pada sebelum dan setelah mengalami pelemahan.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \tag{1}$$

Di mana I adalah intensitas sinar beta setelah mengalami pelemahan dan I₀ adalah intensitas sinar beta sebelum mengalami pelemahan. µ adalah koefisien absorpsi (cm²/g) dan x adalah rapat massa dari partikel yang mengabsorpsi. Selanjutnya Persamaan (1) dapat diturunkan untuk menentukan nilai x, sehingga Persamaan (2) dapat dituliskan :

$$\frac{-1}{\mu} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = x \tag{2}$$

Di dalam perhitungan praktis pada rangkaian pengoperasian BAM 1020, udara yang dihisap akan masuk melalui inlet dengan kecepatan yang konstan (Q) dalam jangka waktu tertentu (Δt). Selanjutnya sampel udara tersebut akan bergerak masuk melalui sebuah filter pada luasan tertentu (A). Persamaan (3) menunjukkan perhitungan konsentrasi PM 10, dimana :

$$c = \frac{10^6 A}{Q \Delta t \mu} \tag{3}$$

C adalah konsentrasi dari PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), A adalah luas penampang filter (cm^2), Q adalah kecepatan aliran (L/menit) dan Δt adalah selang waktu sampling. Pada Persamaan (3), nilai perhitungannya belum dimasukkan faktor pengurangan intensitas sinar beta, sehingga :

$$c = \frac{10^6 A \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{Q \Delta t \mu} \tag{4}$$

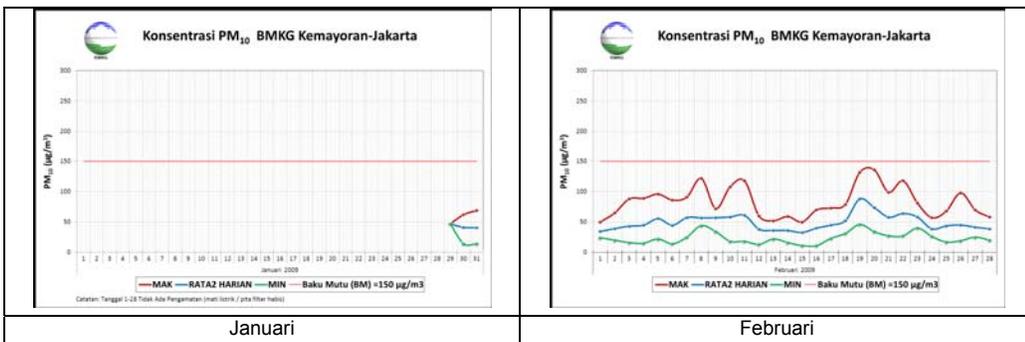
Dengan demikian Persamaan (4) merupakan persamaan praktis di dalam menghitung nilai konsentrasi PM₁₀ yang diukur dengan menggunakan instrumen BAM 1020. Selanjutnya data konsentrasi PM₁₀ yang terukur disimpan di dalam data logger dan dapat ditampilkan pada layar monitor PC melalui koneksi serial RS-232.

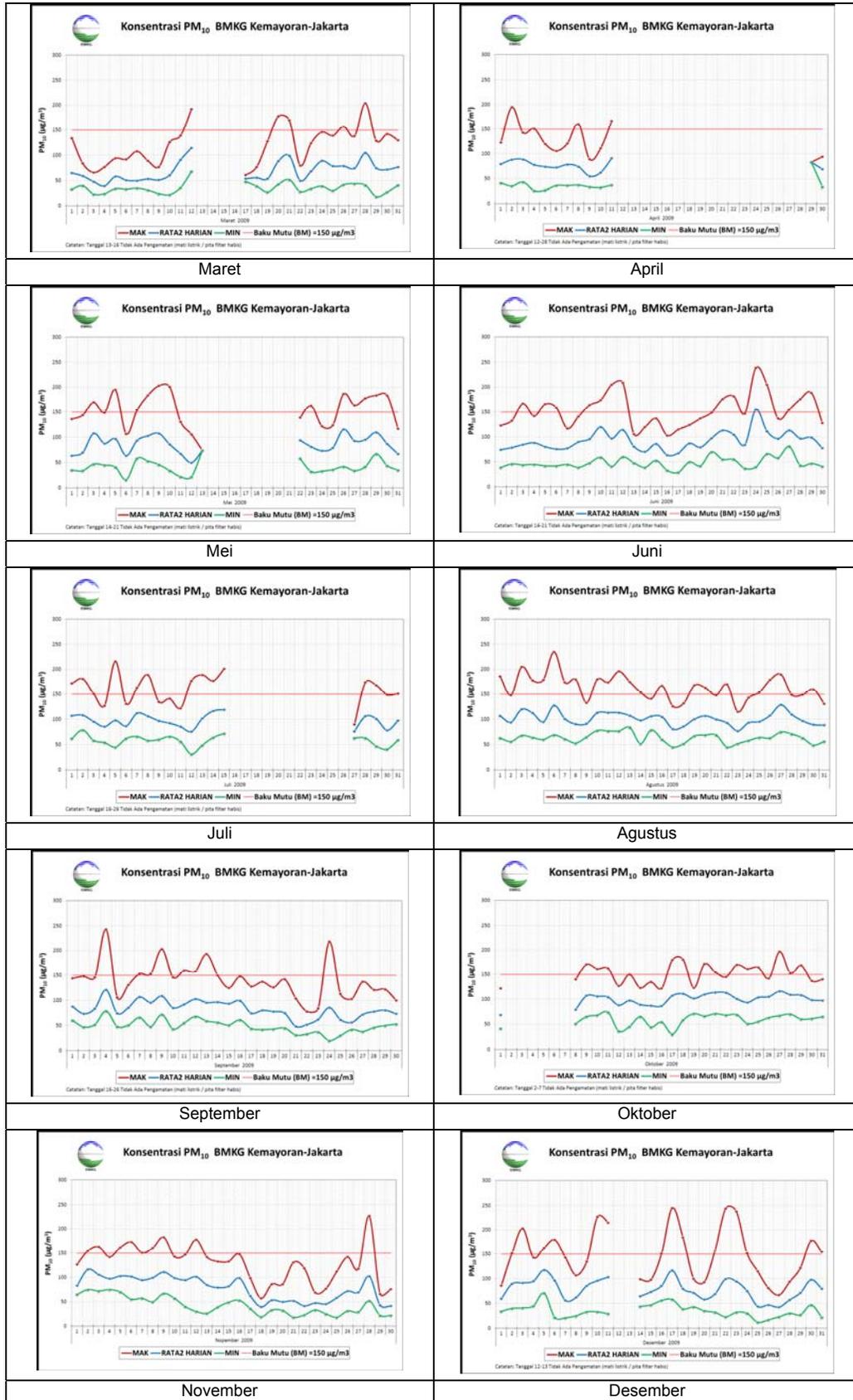
HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi Harian PM₁₀ Tahun 2009

Variasi harian dari pengamatan aerosol PM₁₀ pada tahun 2009 di Stasiun 745 Kemayoran Jakarta menunjukkan kecenderungan yang berfluktuasi (Gambar 2). Pada bulan Februari, 2009 konsentrasi PM₁₀ tidak ada yang mencapai di atas ambang batas yaitu sebesar 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ pada bulan tersebut sebesar 49,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil ini sebenarnya relatif lebih tinggi dibandingkan bulan Januari 2009, dimana pada bulan tersebut data konsentrasi PM₁₀ hanya tersedia 3 buah. Kondisi tidak adanya proses pengamatan antara tanggal 1-28 Januari 2010 lebih disebabkan oleh beberapa faktor teknis seperti padamnya listrik dan tidak tersedianya filter BAM karena persediaan yang terbatas. Meskipun demikian, kondisi ini juga dapat dihubungkan dengan tingginya akumulasi curah hujan yang terjadi pada bulan Pebruari 2010 yakni sebesar 227,50 mm. Karena seperti diketahui, keadaan cuaca yang diikuti dengan hujan akan berperan sebagai pencuci atmosfer, sehingga menurunkan konsentrasi aerosol PM₁₀ di atmosfer.

Nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ yang berfluktuatif pada hakekatnya secara fisis, lebih disebabkan oleh kaitannya terhadap kondisi fisis-atmosfer terutama curah hujan. Pada bulan Februari 2009, menurunnya nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ diikuti oleh meningkatnya akumulasi curah hujan pada bulan tersebut yang mencapai 227,50 mm. Sedangkan pada bulan Agustus 2009, nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ mencapai angka tertinggi yaitu sebesar 101,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tingginya nilai tersebut, juga diikuti oleh menurunnya akumulasi curah hujan yang hanya mencapai 2 mm. Sehingga berdasarkan hasil perbandingan tersebut, ada kaitan atau hubungan yang erat antara kenaikan atau penurunan konsentrasi PM₁₀ terhadap akumulasi curah hujan.

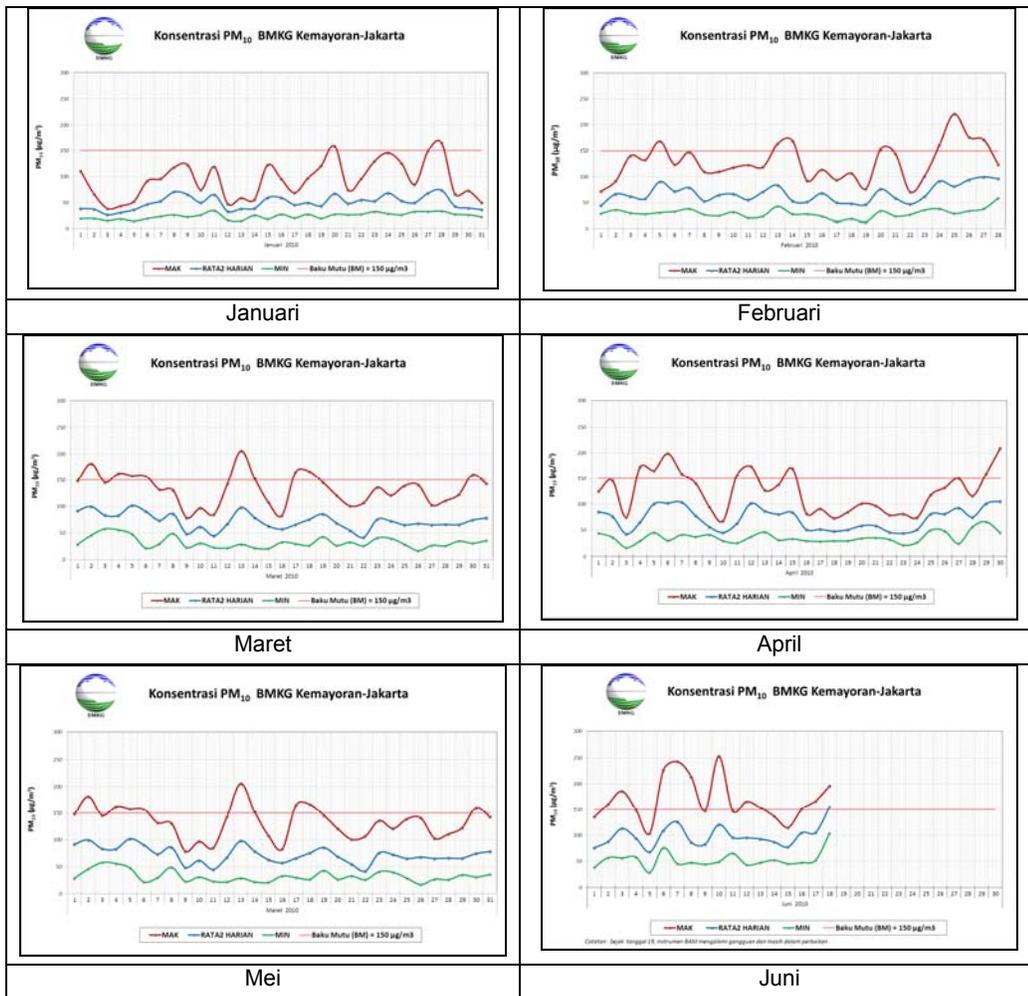




Gambar 2. Variasi Harian PM₁₀ Periode September – Desember 2010.

Variasi Harian PM₁₀ Tahun 2010

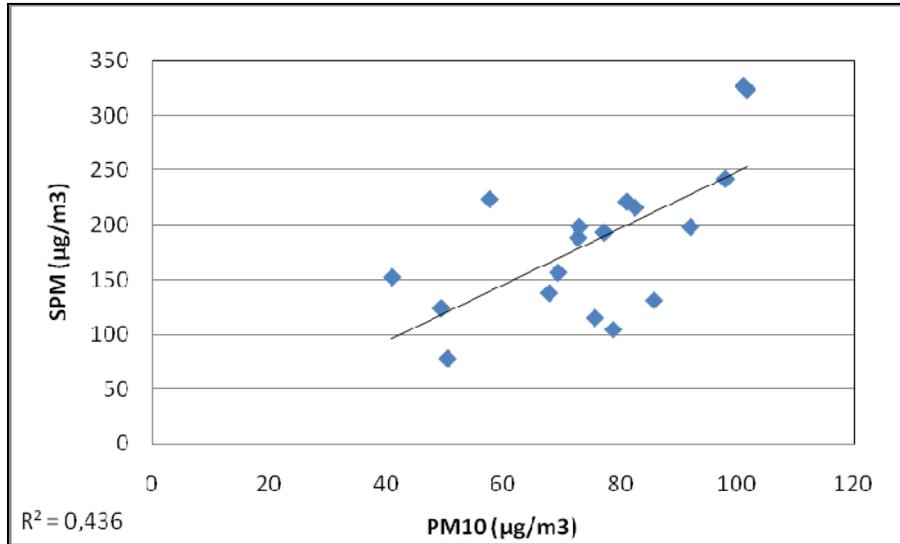
Berdasarkan data pengamatan pada tahun 2010, pola konsentrasi PM₁₀ masih terlihat berfluktuasi di (Gambar 3). Nilai rata-rata tertinggi konsentrasi PM₁₀ terjadi pada bulan Mei 2010 yaitu sebesar 81,10 µg/m³, sedangkan nilai rata-rata terendah terjadi pada bulan Januari 2010 yaitu sebesar 50,48 µg/m³. Hal ini tentunya masih terkait dengan kondisi atmosfer di aras wilayah DKI Jakarta. Pada bulan Januari 2010, menurunnya nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ lebih disebabkan oleh tingginya akumulasi curah hujan pada bulan tersebut yang mencapai 335,90 mm. Sebaliknya pada bulan Mei 2010, tingginya nilai rata-rata konsentrasi PM₁₀ berkebalikan dengan menurunnya akumulasi curah hujan yang hanya mencapai 93,20 mm. Pola ini terlihat sama dengan yang diamati pada tahun 2009.



Gambar 3. Variasi Harian PM₁₀ Periode Januari – Juni 2010

Korelasi Antara PM₁₀ dan SPM

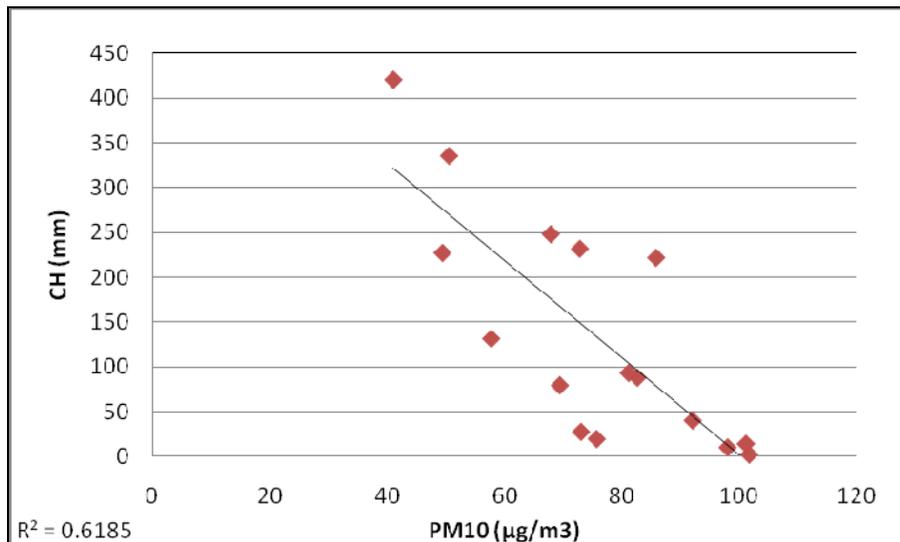
Perhitungan korelasi merupakan analisis yang sederhana untuk mengetahui keterkaitan suatu unsur satu dengan yang lainnya. Dalam perhitungan korelasi ini, digunakan sebaran data PM₁₀, SPM dan curah hujan selama periode Januari 2009 hingga Juni 2010. Pada Gambar 4, hasil korelasi antara PM₁₀ dengan SPM menunjukkan hubungan yang cukup besar atau diatas 0,5. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai regresi linier yang dicapai oleh kedua parameter tersebut mencapai 0,66 ($R^2 = 0,436$). Secara fisis, kondisi tersebut membuktikan bahwa kenaikan/penurunan PM₁₀ dipengaruhi sebesar 66% oleh keberadaan SPM. Sebagai sebuah partikel yang mengambang di atmosfer, SPM mengandung sekitar 60% partikel aerosol PM₁₀. Oleh karena itu jelas terlihat disini bahwa hubungan yang dibentuk keduanya tampak terkait cukup erat dikarenakan sifat fisis yang dimiliki keduanya memiliki karakteristik yang sama.



Gambar 4. Korelasi PM₁₀ vs SPM.

Korelasi Antara PM10 dan Curah Hujan

Keberadaan PM₁₀ di atmosfer sangat berkaitan erat terhadap kondisi fisis serta dinamika atmosfer. Hal ini dapat ditunjukkan pada sub bab sebelumnya dimana adanya keterkaitan yang erat antara variasi harian terhadap intensitas curah hujan. Hasil korelasi antara PM10 dengan curah hujan menunjukkan hubungan yang cukup besar (Gambar 5). Hasil perhitungan, nilai regresi linier yang dicapai oleh kedua parameter tersebut mencapai -0,79 ($R^2 = 0,6185$). Artinya bahwa kondisi tersebut membuktikan bahwa kenaikan/penurunan PM₁₀ dipengaruhi sebesar 79% oleh kondisi curah hujan dalam hal ini atmosfer. Hubungan korelasi yang dibentuk adalah korelasi bernilai negatif, sehingga jika intensitas curah hujan meningkat maka konsentrasi PM₁₀ justru menurun, atau sebaliknya jika intensitas curah hujan menurun, konsentrasi PM₁₀ justru meningkat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa secara teoritis, intensitas curah hujan sangat menentukan karakteristik PM₁₀ di atmosfer.

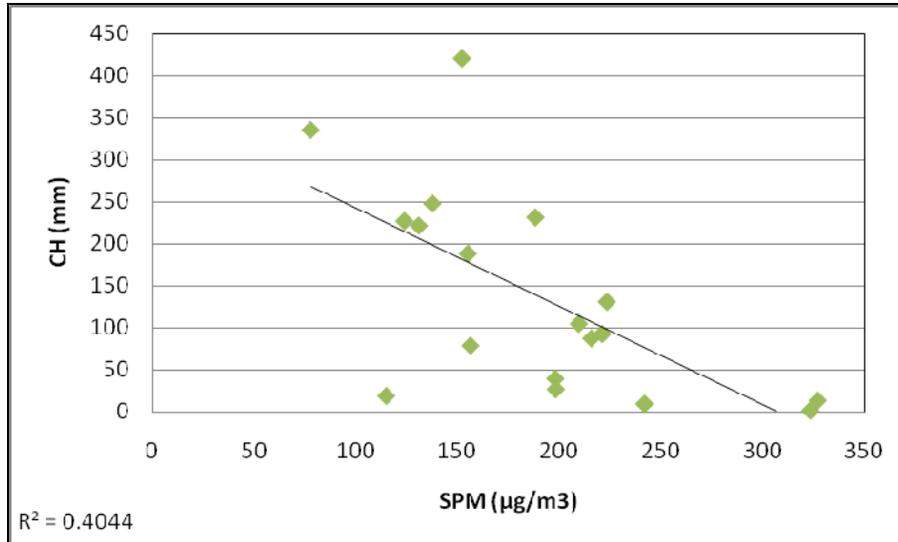


Gambar 5. Korelasi PM₁₀ vs Curah Hujan.

Korelasi Antara SPM dan Curah Hujan

Meskipun hasil korelasi antara PM₁₀ dengan intensitas curah hujan telah diperoleh, namun perhitungan korelasi antara SPM dan intensitas curah hujan perlu untuk diketahui. Hasilnya diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan pembandingan untuk menentukan karakteristik

PM₁₀ itu sendiri. Hasil perhitungan korelasi antara SPM dan curah hujan bernilai -0,64 (0,404) dan hubungan yang dibentuk berkorelasi terbalik (Gambar 6). Kondisi ini tampak hampir sama seperti yang ditunjukkan oleh PM₁₀. Nilai korelasi SPM yang lebih kecil dibandingkan PM₁₀ merupakan hal yang logis, mengingat di dalam SPM terkandung sekitar 66% komposisi PM₁₀ (Gambar 4).



Gambar 6. Korelasi SPM vs Curah Hujan.

Variasi ukuran serta konsentrasi PM₁₀ di berbagai wilayah dinilai sangat penting. Tidak hanya untuk karakterisasi dari sebuah sistem aerosol, namun juga untuk mempelajari proses-proses pembentukan awan (Zuev, 1982), *radiative properties* (Krisnamurthy, 1988) dan juga efek pemanasan global yang disebabkan oleh gas-gas rumah kaca (Harshavardhan, 1993) yang terjadi di wilayah atmosfer dimana seluruh aerosol terdistribusi.

Beberapa studi tentang karakteristik dari PM₁₀ pernah dilakukan oleh Hoppel *et al.* (1990) dan Park *et al.* (1990) khususnya di wilayah lintang tinggi, namun studi yang dilakukan khususnya di wilayah lintang rendah dan ekuator sangat terbatas. Singhal *et al.*, 1985 dan yang lainnya pernah melakukan studi yang berkaitan dengan karakteristik aerosol baik pada variasi diurnal, musiman dan tahunan pada lintang rendah.

Aerosol PM₁₀ secara umum bersifat higroskopis, sehingga kelembaban relatif memegang peranan penting di dalam menentukan properti radiatif dari aerosol (Parmeswaran dan Vizaykumar, 1994). Hanel (1976) juga pernah melakukan penelitian bahwa perubahan di dalam properti aerosol merupakan fungsi dari kelembaban relatif (RH). Devara dan Raj (1998) telah mencoba untuk menemukan hubungan antara parameter-parameter meteorologi dan distribusi kolom-kolom aerosol.

Parmeswaran *et al.* (1995) telah mempelajari variasi *aerosol optical depth* (AOD) pada periode bulan Juni 1989 hingga Desember 1990 serta hubungannya dengan berbagai variasi faktor meteorologi seperti kecepatan angin, curah hujan, kelembaban relatif dan lain-lain di stasiun maritim setempat, dimana laut memainkan peranan penting di dalam menggerakkan proses-proses meteorologi. Hanel dan Lehman (1981) dan Shaw (1988) juga telah mencoba untuk mempelajari tentang ukuran distribusi dari aerosol di atmosfer serta keterkaitannya terhadap kondisi meteorologi.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, PM₁₀ yang merupakan aerosol yang terdistribusi secara fluktuatif mengikuti kondisi fisis/dinamis atmosfer. Hasil perhitungan korelasi antara ketiga parameter, baik PM₁₀, SPM dan curah hujan telah memberikan penegasan bahwa karakteristik ketiganya memiliki hubungan yang cukup kuat. Hujan yang merupakan gabungan dari proses fisis dan dinamis atmosfer telah memberikan kontribusi yang cukup besar di dalam menentukan sifat-sifat PM₁₀ dan SPM. Selain berperan sebagai properti radiatif di atmosfer, PM₁₀ tampaknya juga akan dapat mempengaruhi kesehatan manusia terutama pada sistem

pernafasan. Oleh karena itu, pada saat terjadi musim kemarau, dimana intensitas curah hujan menurun secara signifikan, maka diperlukan suatu informasi peringatan dini guna mencegah dari bahaya PM₁₀ terhadap kesehatan manusia. Untuk kedepannya diperlukan suatu pemetaan distribusi unsur-unsur PM₁₀ secara musiman khususnya di wilayah DKI Jakarta agar dapat mendukung peningkatan pemahaman masyarakat terutama bagi sektor kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Devara, P.C.S. and P.E. Raj. 1998. A lidar study of atmospheric aerosols during two contrasting monsoon season. *Atmosféra*, 11, 199-204.
- Hanel, G. 1976. *The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at thermodynamic equilibrium with surrounding of moist air*, Advances in Geophysics, Academic Press Inc., New York, USA, 19, 73-188.
- Harshvardhan. 1993. *Aerosol-Climate Interactions*. International Geophysics Series, 54, 57-71.
- Hoppel, W.A., J. W. Fitzeraled, G. M. Frick, R. E. Larson, and E. J. Mack. 1990. Aerosol size distribution and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean. *J. Geophysics. Res.*, 95, 3659-3686.
- Krisna Murthy, B. V. 1988. Aerosol and radiation budget in the middle atmosphere. *Indian J. Radio Space Phys.*, 17, 203-219.
- Parameswaran, K. and Vizaykumar. 1994. Effect of atmospheric relative humidity on aerosol size distribution. *Indian J. Radio Space Phys*, 23, 175-188.
- Parameswaran, K., G. Vizaykumar, B. V. Krihsna Murthy. and K. Krishna Moorthy. 1995. Effect of wind speed on mixing region aerosol concentration at a tropical coastal station. *J. App. Meteor.*, 34, 1392-1397.
- Park, P. M., M. H. Smith and H. J. Exton. 1990. The effect of mixing ratio on maritime aerosol concentration over North Atlantic Ocean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116, 461-476.
- Singh, A. K., J. Rai, and S. Niwas. 2000. Variation of aerosols in relation to some meteorological parameters during different weather conditions. *Atmosféra*, 13, 177-184.
- Singhal, S.P., S. K. Agarwal, D. R. Pahwa and B. S. Gera. 1985. Stability studies with the help of acousting sounding. *Atmospheric Environment.*, 19, 221-228.

IDENTIFIKASI AWAL PERUBAHAN IKLIM MIKRO TERHADAP RUANG TERBUKA HIJAU/AIR DALAM KONSEP GREENCITY DI KOTA SEMARANG BERDASARKAN STUDI LITERATUR

Guswanto

ABSTRACT

Preliminary study of surface ozone monitoring at Padang has been done. Monitoring period was conducted from July 2008 to July 2009. Within this period, the average concentration of surface ozone at Padang is 9.97 ppb_h, with maximum and minimum concentration are 0.2 and 60.9 ppb_h, respectively. High concentration was due to intense anthropogenic activity during the day time from vehicles and industries. Meanwhile, ozone concentration in the night is measured lower. It was also obtained that meteorological parameters in Padang are positively correlated with the concentration trend.

Keywords: *surface ozone, Padang, meteorological parameters.*

PENDAHULUAN

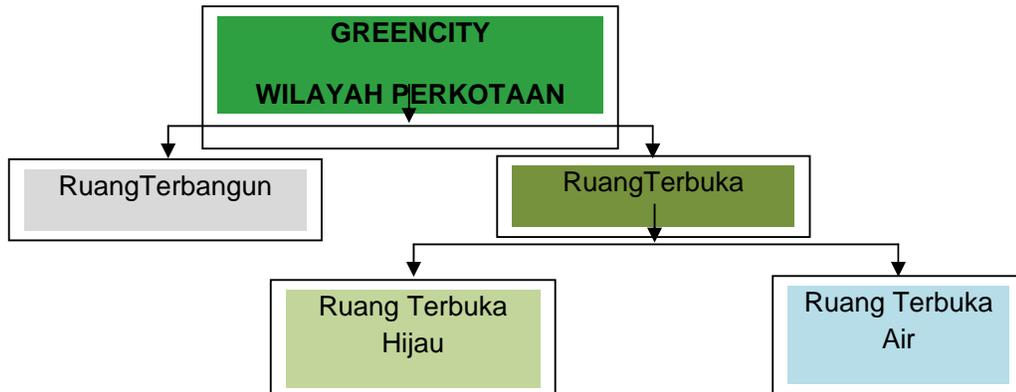
Urbanisasi dan perkembangan wilayah perkotaan telah menimbulkan permasalahan tentang lapangan kerja, kemiskinan, menurunnya kualitas lingkungan hidup dan rendahnya tingkat kenyamanan di beberapa kota-kota besar di Indonesia. Hal ini sebagai akibat tidak seimbangnya antara kebutuhan kota dengan daya tampung/dukung yang dimiliki perkotaan secara normal dan alamiah. Mereka membutuhkan ruang, udara, minyak bumi, makanan dan air secara terus menerus. Kota-kota ini pula yang akan menghasilkan sampah, limbah cair dan polusi udara. Apabila dua hal ini berjalan seimbang, maka kota-kota besar ini akan berjalan dengan normal. Tetapi bila tidak seimbang akan memunculkan permasalahan menurunnya kualitas lingkungan hidup dan tingkat kenyamanan. Polusi udara pada akhirnya menyebabkan terjadinya perubahan cuaca yang sangat ekstrem. Urbanisasi telah menyebabkan kerusakan ekosistem tidak hanya berskala lokal tetapi juga nasional dan global. Alam Indonesia menyediakan udara, makanan dan minuman untuk kebutuhan hidup rakyat Indonesia. Alam mengatur lingkungan kita dengan membersihkan udara (melalui pohon) dan membersihkan air (melalui dataran tinggi dan lembah-lembah). Satu pohon, pada kenyataannya hanya mampu menyediakan oksigen untuk dua orang saja. Alam pun telah memperkaya hidup manusia melalui ruang-ruang hijau dimana kita bisa berekreasi dan merasa nyaman sehingga bisa melakukan kontak sosial dengan sesama.

Kota Semarang secara administrasi terdiri dari 16 wilayah kecamatan dengan gradasi topografi dari utara menuju ke selatan semakin naik. Wilayah utara Kota Semarang sangat landai bahkan sering kali dilanda banjir air laut pasang (ROB). Sedangkan di wilayah selatan kota Semarang udara sangat sejuk dari wilayah perbukitan di Kabupaten Semarang. Konsekuensi dari beragamnya bentuk biogeofisik bumi adalah terdapatnya beragam kegiatan pembangunan yang layak berkembang pada hamparan bumi tersebut. Bentuk relief permukaan bumi, baik lahan daratan maupun lahan perairan umumnya mempunyai karakteristik biogeofisik yang heterogen. Bentuk biogeofisik ini dapat berupa kondisi tanah, topografi, geomorfologi, iklim, kualitas beserta dinamika makhluk hidup di atasnya.

Pertumbuhan penduduk di perkotaan semakin signifikan sejalan dengan perkembangan perekonomian, teknologi informasi, pendidikan, budaya dan tidak ketinggalan termasuk sosial budaya. Daya pikat kota yang begitu mempesona menjadikan perpindahan penduduk pedesaan pindah menuju ke kota, laju urbanisasi cukup pesat dan cukup meningkat. Besarnya tekanan yang dialami Kota kawasan ini adalah konsekuensi dari besarnya laju pembangunan. Tekanan terhadap kawasan ini juga diperparah oleh sistem pengelolaan pembangunan di lahan atas yang buruk sehingga memberikan dampak terhadap kawasan tersebut. Selain memberikan dampak negatif berupa pencemaran dan sedimentasi, perubahan hidrologi akibat kegiatan manusia (pembangunan) juga memberikan dampak negatif lain di kawasan Kota Semarang.

Dari sisi kebijakan dapat pula dikatakan bahwa Kota Semarang adalah akumulasi produk pengambilan keputusan dari banyak pihak dalam berbagai kurun waktu. Jika proses-proses pengambilan keputusan itu tidak berpedoman pada satu acuan yang jelas dan utuh, aneka keputusan dari banyak pihak itu akan berjalan sendiri-sendiri. Akibat yang sering terjadi adalah pada saat satu keputusan telah dibuat dan dijalankan, ternyata justru memproduksi masalah baru atau menyeret masalah lainnya menjadi semakin parah dan rumit untuk ditangani. Oleh karenanya, perencanaan kota ini memerlukan visi, konsep dan gagasan utuh yang menerobos jauh ke masa depan dan nantinya secara konsisten harus dipegang teguh. Untuk itu perlu dikembangkan secara serius tentang Grand design dengan Konsep Green City di Semarang.

Konsep Kota Hijau (*Greencity*) dapat juga merupakan perpaduan antara ruang terbuka hijau dan ruang terbuka air. Vegetasi dalam ruang terbuka hijau mempunyai peranan yang besar dalam ekosistem, apalagi jika kita mengamati pembangunan yang meningkat di perkotaan yang sering kali tidak menghiraukan kehadiran lahan untuk vegetasi. Vegetasi ini sangat berguna dalam produksi oksigen yang diperlukan manusia untuk proses respirasi (pernafasan), serta untuk mengurangi keberadaan gas karbon dioksida yang semakin banyak di udara akibat kendaraan bermotor dan industri (Irwan, 1992). Sedangkan ruang terbuka air berguna untuk menghasilkan penguapan guna meningkatkan kelembaban udara akibat panas matahari. Suhu udara menjadi tetap sejuk dan lembab serta meningkatkan kenyamanan di suatu perkotaan. Adapun diagram konsep *Greencity* dapat digambarkan sebagai berikut seperti dibawah ini :



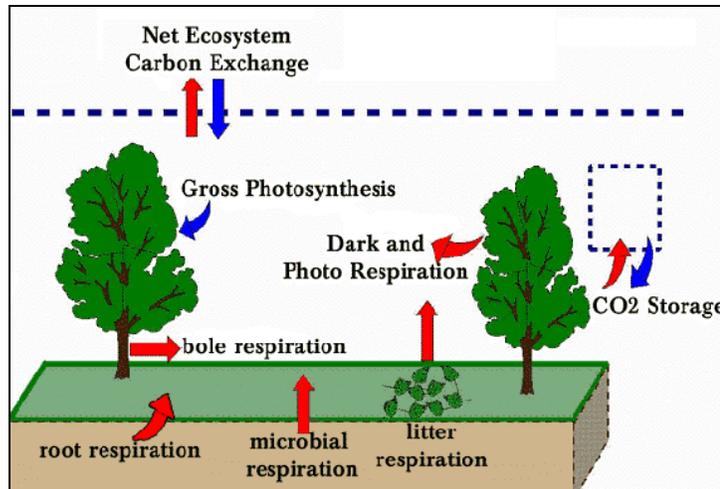
Gambar 1. Diagram konsep *Greencity*.

Konsep Ruang Terbuka Hijau

Definisi dan Pengertian

Ruang Terbuka Hijau (RTH) kota adalah bagian dari ruang-ruang terbuka (*open spaces*) suatu wilayah perkotaan yang diisi oleh tumbuhan, tanaman, dan vegetasi (endemik, introduksi) guna mendukung manfaat langsung dan/atau tidak langsung yang dihasilkan oleh RTH dalam kota tersebut yaitu keamanan, kenyamanan, kesejahteraan, dan keindahan wilayah perkotaan tersebut. Sesungguhnya RTH akan menyerap zat pencemar udara Karbondioksida (CO_2) dan menghasilkan Oksigen (O_2).

Berdasarkan sifat alamiah, bentuk RTH dapat diklasifikasi menjadi (a) bentuk RTH alami (habitat liar/alami, kawasan lindung) dan (b) bentuk RTH non alami atau RTH binaan (pertanian kota, pertamanan kota, lapangan olah raga dan pemakaman). Berdasarkan penggunaan lahan atau kawasan fungsionalnya diklasifikasi menjadi (a) RTH kawasan perdagangan, (b) RTH kawasan perindustrian, (c) RTH kawasan permukiman, (d) RTH kawasan pertanian, dan (e) RTH kawasan-kawasan khusus, seperti pemakaman, hankam, olah raga dan alamiah.



Gambar 2. Keseimbangan karbon kanopi tanaman.

(Sumber: <http://nature.berkeley.edu/biometlab/opportunities.html>)

Fungsi dan Manfaat

Ruang terbuka hijau memiliki 2 fungsi, yaitu fungsi utama dan fungsi tambahan. Fungsi utama RTH adalah fungsi yang bersifat ekologis dengan terbentuknya ekosistem yang dapat memperbaiki kondisi lingkungan terutama kondisi iklim mikro. Sedangkan fungsi tambahan dari RTH adalah nilai-nilai non ekologis yang muncul dengan keberadaan RTH. Misalnya fungsi arsitektural, fungsi estetika, fungsi tourism dan fungsi ekonomis lainnya.

Manfaat RTH berdasarkan fungsinya dibagi atas manfaat langsung dalam waktu singkat seperti mendapatkan bahan-bahan untuk dijual (kayu, daun, bunga), kenyamanan fisik (teduh, segar), keinginan dan manfaat tidak langsung dan waktu yang lama seperti perlindungan tata air dan konservasi hayati atau keanekaragaman hayati.

Pola dan Struktur Fungsional

Pola RTH kota merupakan struktur RTH yang ditentukan oleh hubungan fungsional (ekologis, sosial, ekonomi, arsitektural) antar komponen pembentuknya. Pola RTH terdiri dari (a) RTH struktural, dan (b) RTH non struktural.

RTH struktural merupakan pola RTH yang dibangun oleh hubungan fungsional antar komponen pembentuknya yang mempunyai pola hierarki planologis yang bersifat antroposentris. RTH tipe ini didominasi oleh fungsi-fungsi non ekologis dengan struktur RTH binaan yang berhierarki. Contohnya adalah struktur RTH berdasarkan fungsi sosial dalam melayani kebutuhan rekreasi luar ruang (*outdoor recreation*) penduduk perkotaan seperti yang diperlihatkan dalam urutan hierarkial sistem pertamanan kota (*urban park system*) yang dimulai dari taman perumahan, taman lingkungan, taman kecamatan, taman kota, taman regional, dst). RTH non struktural merupakan pola RTH yang dibangun oleh hubungan fungsional antar komponen pembentuknya yang umumnya tidak mengikuti pola hierarki planologis karena bersifat ekosentris. RTH tipe ini memiliki fungsi ekologis yang sangat dominan dengan struktur RTH alami yang tidak berhierarki. Contohnya adalah struktur RTH yang dibentuk oleh konfigurasi ekologis bentang alam perkotaan tersebut, seperti RTH kawasan lindung, RTH perbukitan yang terjal, RTH sempadan sungai, RTH sempadan danau, RTH pesisir.

Untuk suatu wilayah perkotaan, maka pola RTH kota tersebut dapat dibangun dengan mengintegrasikan dua pola RTH ini berdasarkan bobot tertinggi pada kerawanan ekologis kota (tipologi alamiah kota: kota lembah, kota pegunungan, kota pantai, kota pulau, dll) sehingga dihasilkan suatu pola RTH struktural.

Elemen Pengisi RTH

RTH dibangun dari kumpulan tumbuhan dan tanaman atau vegetasi yang telah diseleksi dan disesuaikan dengan lokasi serta rencana dan rancangan peruntukannya. Lokasi yang

berbeda (seperti pesisir, pusat kota, kawasan industri, sempadan dan badan-badan air lainnya) akan memiliki permasalahan yang juga berbeda yang selanjutnya berkonsekuensi pada rencana dan rancangan RTH yang berbeda. Untuk keberhasilan rancangan, penanaman dan kelestariannya maka sifat dan ciri serta kriteria (a) arsitektural dan (b) hortikultural tanaman dan vegetasi penyusun RTH harus menjadi bahan pertimbangan dalam me-seleksi jenis-jenis yang akan ditanam.

Persyaratan umum tanaman untuk vegetasi RTH adalah sebagai berikut:

- (1) Dapat menghasilkan O₂ dan meningkatkan kualitas lingkungan kota
- (2) Mampu tumbuh pada lingkungan yang marjinal (tanah tidak subur, udara dan air yang tercemar)
- (3) Tahan terhadap gangguan fisik (*vandalisme*)
- (4) Disenangi dan tidak berbahaya bagi warga kota
- (5) Bibit/benih mudah didapatkan dengan harga yang murah/terjangkau oleh masyarakat
- (6) Perakaran dalam sehingga tidak mudah tumbang
- (7) Tidak gugur daun, cepat tumbuh, bernilai hias dan arsitektural
- (8) Prioritas menggunakan vegetasi endemik/lokal
- (9) Keanekaragaman hayati

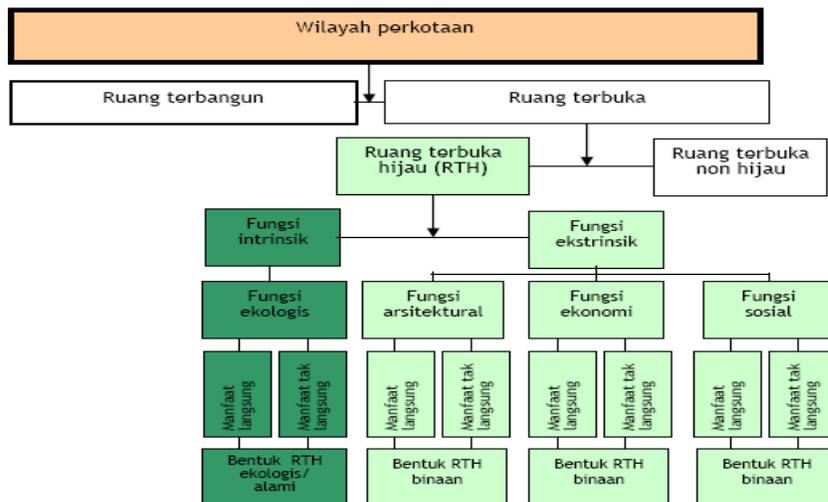
Jenis tanaman endemik atau jenis tanaman lokal yang memiliki keunggulan tertentu (ekologis, sosial budaya, ekonomi, arsitektural) dalam wilayah kota tersebut menjadi bahan tanaman utama penciri RTH kota tersebut, yang selanjutnya akan dikembangkan guna mempertahankan keanekaragaman hayati wilayahnya dan juga nasional.

Teknis Perencanaan

Program pembangunan dan pengembangan RTH yang fungsional suatu wilayah perkotaan dapat memperhatikan 4 (empat) hal utama, yaitu :

- (1) Luas RTH minimum yang diperlukan dalam suatu wilayah perkotaan.
- (2) Lokasi lahan kota yang potensial dan tersedia untuk RTH.
- (3) Struktur dan pola RTH yang akan dikembangkan (bentuk, konfigurasi, dan distribusi).
- (4) Seleksi tanaman sesuai kepentingan dan tujuan pembangunan kota.

Sedangkan luas minimum RTH sangat ditentukan oleh daya dukung alamiah, kebutuhan per kapita (kenyamanan, kesehatan dan pelayanan lainnya), arah dan tujuan pembangunan kota.



Gambar 3. Bagian diagram konsep RTH dalam wilayah perkotaan.
(Sumber : Departemen Arsitektur Lanskap, Fakultas Pertanian-IPB, Bogor, 2005)

Ruang Terbuka Air (RTA)

Panjang garis pantai wilayah pesisir nusantara diperkirakan mencapai 81.000 km atau kedua terpanjang di dunia setelah Canada, sesuai PP No. 47/1987 tentang Rencana Tata Ruang dan Wilayah Nasional mengenai usulan 516 kota-kota strategis di Indonesia, di mana telah dibangun 22 buah Ibukota Propinsi (kota besar) dari 216 kota yang terletak di tepian perairan, termasuk tepian sungai dan danau yang umum disebut *Waterfront City* (Purnomohadi, 1999).

Dalam rangka untuk memaksimalkan konsep Green City dengan kualitas lingkungan udara yang sehat dan nyaman, maka perlu juga dikembangkan Ruang Terbuka Air berfungsi untuk mengurangi panas yang terjadi. Dengan banyaknya badan air yang menguap terkena panas, maka diharapkan udara menjadi lembab dan nyaman seiring dengan bertiupnya angin. Di Kota Semarang jumlah Ruang Terbuka Air sangat banyak sekali, antara lain tambak di pesisir utara, Danau/Rawa, Sungai dan badan air lainnya.

Kenaikan Suhu Global

Masalah lingkungan hidup wilayah perkotaan menjadi banyak perbincangan saat ini, salah satunya adalah berkurangnya Ruang Terbuka Hijau (RTH). Hilangnya RTH akan memicu terjadinya *heat island*, karena berkurangnya vegetasi sebagai pengendali emisi di perkotaan. Secara iklim mikro hutan kota berfungsi menurunkan suhu pada waktu siang hari dan sebaliknya pada malam hari dapat lebih hangat karena tajuk pohon dapat menahan radiasi balik (reradiasi) dari bumi. Jumlah pantulan radiasi matahari suatu hutan sangat dipengaruhi oleh panjang gelombang, jenis tanaman, umur tanaman, posisi jatuhnya sinar matahari, keadaan cuaca dan posisi lintang. Suhu udara pada daerah berhutan lebih nyaman daripada daerah yang tidak ditumbuhi oleh tanaman. Selain suhu, unsur iklim mikro lain yang diatur oleh hutan kota adalah kelembaban. Pohon dapat memberikan kesejukan pada daerah-daerah kota yang panas (*heat island*) akibat pantulan panas matahari yang berasal dari gedung-gedung, aspal dan baja. Daerah ini akan menghasilkan suhu udara 3-10 derajat lebih tinggi dibandingkan dengan daerah pedesaan. Penanaman pohon pada suatu areal akan mengurangi temperatur atmosfer pada wilayah yang panas tersebut (*Forest Service Publications*, 2003. *Trees Modify Local Climate*, 2003). Pemanasan yang terjadi di permukaan bumi sangat terasa saat ini dan seiring terjadinya kenaikan suhu udara global selama 100 tahun yaitu sekitar $0.5^{\circ} - 0.7^{\circ}$ Celcius (IPCC, 2007).

Maksud dari penelitian ini adalah mendapatkan gambaran menurunnya iklim mikro akibat pencemaran udara dan berkurangnya vegetasi di RTH sebagai produksi oksigen dalam Rancangan Green City Kota Semarang.

Penelitian ini bertujuan untuk dapat memberikan masukan berupa gambaran, ide, konsep atau program apa yang harus dilakukan dalam mengelola Kota Semarang menjadi Kota Hijau (Greencity).

METODE PENELITIAN

Data

Penelitian dilakukan di Semarang, yaitu Kabupaten Semarang, Kodya Semarang dan Kodya Salatiga. Di dalam penelitian ini digunakan beberapa data antara lain data tabular, data spasial dan beberapa gambar yang menunjukkan fakta di lapangan. Adapun data-data tersebut antara lain wilayah administrasi, kepadatan penduduk, penggunaan lahan, data iklim (Curah hujan dan temperatur), topografi wilayah, dan beberapa data sosial ekonomi lainnya.

Metode

Penelitian dilakukan dengan menghitung luasan RTH (Ruang terbuka hijau) di Semarang, mengevaluasi kondisi iklim (Curah hujan dan temperatur) dan menghitung kebutuhan RTH (Sesuai Standar Nasional) untuk memperbaiki kondisi iklim mikro. Analisis untuk mengukur masing-masing variabel menggunakan beberapa rumus dan beberapa pendekatan.

Keadaan sebaran vegetasi/penggunaan tanah yang dapat dihitung dengan cara menjumlahkan nilai dari komposisi jenis vegetasi/penggunaan tanah setiap kelas dibagi jumlah seluruh kelas dan dikalikan 100%. Kondisi iklim mikro, parameter yang diamati

adalah Suhu Maksimum, Suhu Minimum dan Suhu Rata-rata. Termasuk kelembaban Relatif juga kita amati, selanjutnya kita hitung Indeks kenyamanan (IK), ditentukan dari hasil pengukuran temperatur dan kelembaban relatif dengan menggunakan rumus Nieuwolt (1975 dalam Malik, 2006) :

$$IK = 0.8 T + \{(RH \times T) / 500\} \quad (1)$$

Kebutuhan Ruang Terbuka Hijau dihitung dari data sekunder menggunakan metode Geravkis dalam Fandeli dkk, (2004) sebagai berikut :

$$LT = (Xt + Zt) / (54 \times 0.9375) \text{ m}^2 \quad (2)$$

Di mana:

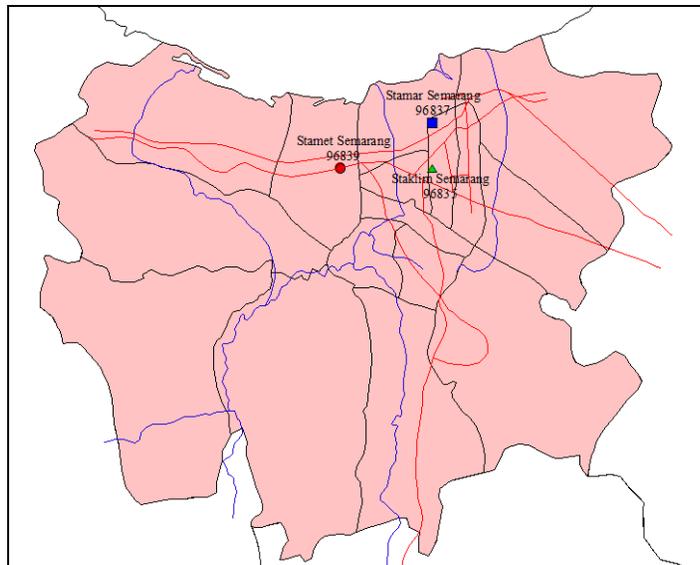
- Lt = Luas RTH yang dibutuhkan pada tahun t (ha)
- Xt = Kebutuhan Oksigen manusia (penduduk) pada tahun t (ton/hari)
- Zt = Jumlah kebutuhan oksigen pada kendaraan bermotor tahun t (ton/hari)
- 54 = Konstanta yang menyatakan bahwa setiap 1 m² lahan per hari mampu menghasilkan bahan kering sebanyak 54 gram.
- 0.9375 = Konstanta yang menunjukkan bahwa setiap 1 gram bahan kering setara dengan produksi Oksigen sebanyak 0.9375.

Secara umum luas ruang terbuka hijau telah diatur dalam Undang-Undang Penataan Ruang (UUPR) No. 26 Tahun 2007, bahwa luas ruang terbuka hijau berkisar 30 % dengan rincian 20 % publik dan 10 % adalah privat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Indek Kenyamanan

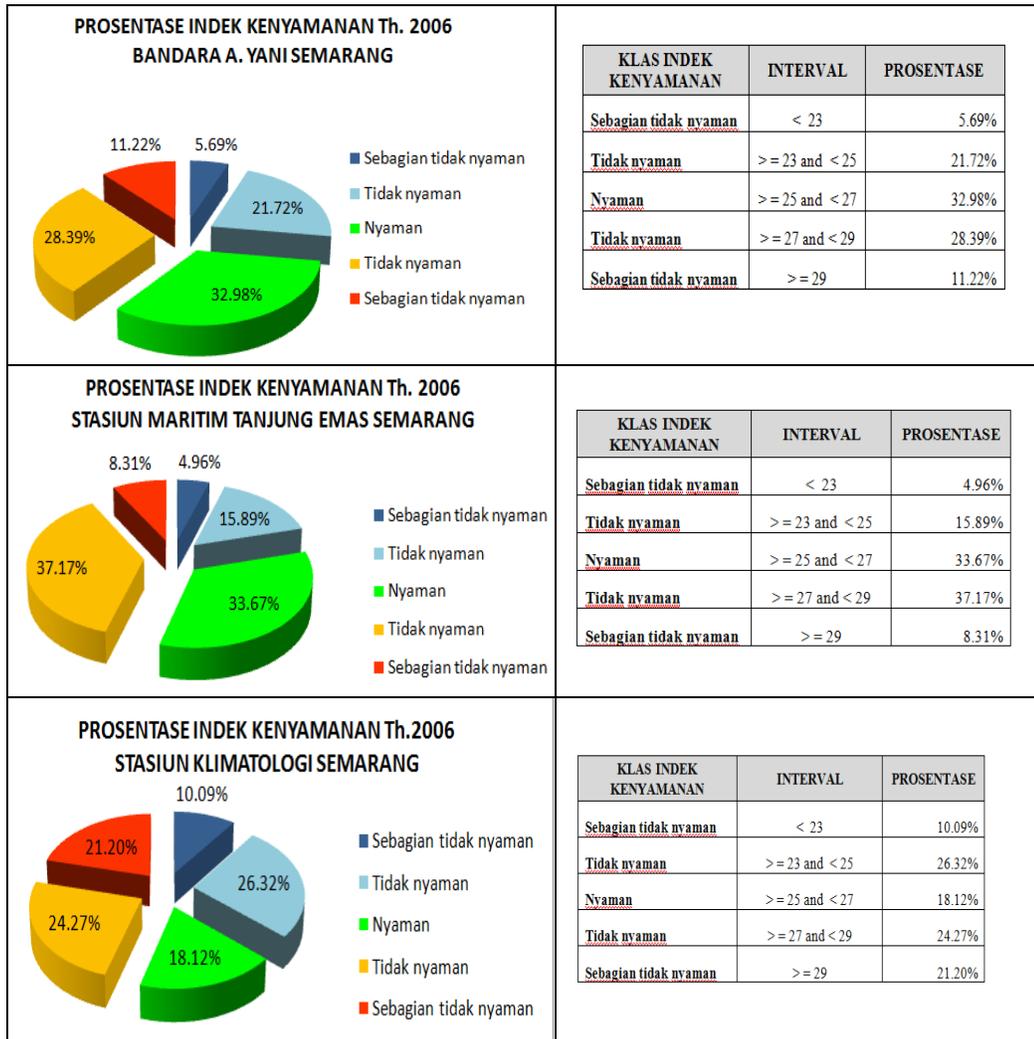
Berdasarkan lokasi pemantauan cuaca diketahui bahwa di Semarang terdapat 3 lokasi, yaitu 1). Staklim Semarang, 2) Stamet Semarang, Bandara A. Yani dan 3). Stamar Semarang, Tanjung Emas.



Gambar 4. Lokasi Stasiun Cuaca di Kota Semarang.

Dari stasiun pemantau cuaca tersebut dikumpulkan data suhu dan kelembaban relatif pada tahun 2006. Data berasal dari pengamatan sinoptik setiap 6 jam selama 1 tahun pada tahun 2006. Dengan menggunakan formula diatas, kita hitung Prosentase Indeks Kenyamanan di Kota Semarang berdasarkan 3 lokasi tersebut. Adapun tingkat kenyamanan yang didapat sebagai berikut:

1. Kota Semarang dalam posisi “Tidak nyaman dan Sebagian Tidak Nyaman” sekitar 27 %, yaitu sekitar 100 hari dalam setahun dalam kondisi terlalu dingin.
2. Kota Semarang dalam posisi “Nyaman” sekitar 28 %, yaitu sekitar 102 hari dalam setahun. Namun dari ketiga lokasi di atas ternyata yang memiliki prosentase terendah adalah di Stasiun Klimatologi (18.2 %) sedangkan di Bandara Ahmad Yani dan Stasiun Maritim berkisar 32, 98 % dan 33.67 %. Kondisi ini sangat mendukung apabila dilihat dari letak lokasi, RTH dan RTA yang ada.
3. Kota Semarang dalam posisi “Tidak nyaman dan Sebagian Tidak Nyaman” sekitar 45 %, yaitu sekitar 163 hari dalam setahun dalam kondisi terlalu panas.



Gambar 5. Indeks Kenyamanan di 3 lokasi di Kota Semarang Pada Tahun 2006

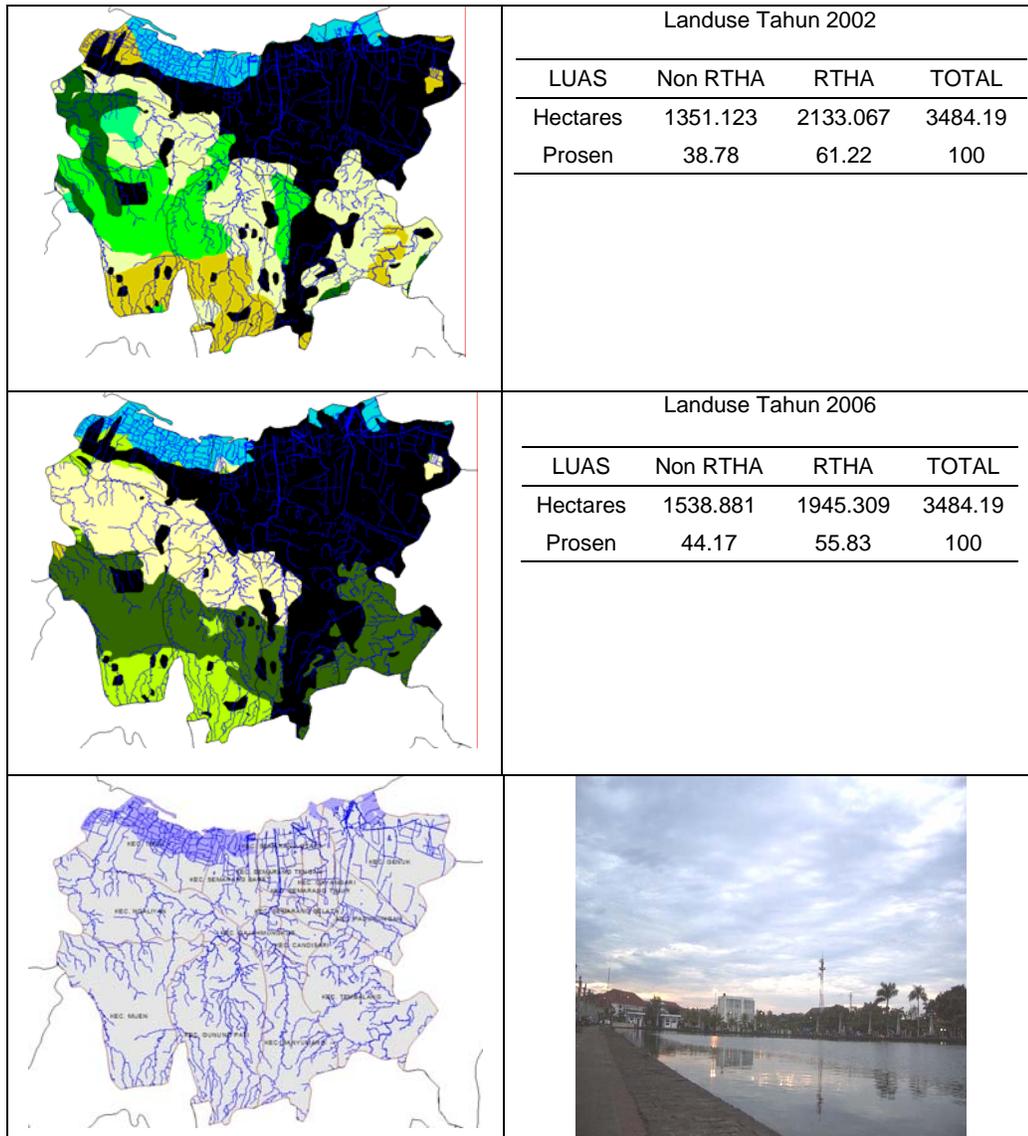
Ruang Terbuka Hijau/Air (RTHA)

Berdasarkan perhitungan metode Geravkis dan data jumlah kendaraan dan jumlah penduduk di tahun bersangkutan, maka didapatkan bahwa luas ruang terbuka hijau berubah-ubah berkisar antara 33 – 36 % dari total luas Kota Semarang. Karena luas wilayah Kota Semarang tetap, sedangkan jumlah kendaraan dan jumlah penduduk meningkat, maka besar luasan RTH yang dibutuhkan akan semakin meningkat (Tabel 1).

Tabel 1. Perhitungan luas RTHA di kota Semarang tahun 2002 – 2006.

TAHUN	PENDUDUK (PT)	JUMLAH KENDARAAN	Xt	Zt	Luas-RTHA (Ha)	Prosentase %
2002	1322320	111159	584571225.6	1551.869	1154.71172	33
2003	1350005	124843	596810210.4	1742.908	1178.88787	34
2004	1378193	134171	609271561.4	1873.134	1203.50314	35
2005	1399421	115423	618656035.7	1611.397	1222.03986	35
2006	1419478	116590	627522834.2	1627.69	1239.55455	36

Berdasarkan hasil perhitungan spasial dengan konsep bahwa Greencity dapat dibangun oleh Ruang terbuka hijau dan ruang terbuka air. Fakta ruang terbuka hijau/air di Kota Semarang sebagai berikut :



Gambar 6. Kondisi RTH dan RTA Kota Semarang (a) tahun 2002; (b) tahun 2006; (c) RTA kota Semarang dan polder Tawang Semarang

Distribusi RTHA di Kota Semarang

Secara kuantitas ruang terbuka hijau dan ruang terbuka air di Kota Semarang cukup memadai, namun secara kualitas belum terpenuhi. Fakta menunjukkan bahwa tingkat

kenyamanan di Kota Semarang dalam kondisi Nyaman hanya berkisar 28 % dalam atau 102 hari saja dalam satu tahun. Hal ini menunjukkan bahwa RTHA yang berfungsi memproduksi Oksigen dan menyerap Karbondioksida guna mempertahankan kenyamanan Suhu dan RH belum tercapai. Sehingga distribusi RTHA harus merata di setiap Kecamatan atau sudut Kota Semarang, artinya setiap Kecamatan harus memiliki RTHA 30 % dari luas wilayahnya. Dari 16 kecamatan yang terdapat di Kota Semarang, terdapat delapan kecamatan yang belum memenuhi ketentuan RTH, antara lain Gajah Mungkur (7,48 %), Candisari (6,26 %), Pedurungan (24,18 %), Gayamsari (19,21 %), Semarang Timur (9,54 %), Semarang Utara (9,47 %), Semarang Tengah (11,9 %) dan Semarang Barat (27,9 %).



Gambar 7. Beberapa RTH di Kota Semarang

KESIMPULAN

Hasil pengolahan data iklim (Suhu & RH) tahun menunjukkan bahwa tingkat kenyamanan di Kota Semarang terdiri dari a). Tingkat kenyamanan “ Nyaman “ di Kota Semarang hanya berkisar 102 hari dalam setahun atau 28 %. b). Tingkat kenyamanan “Tidak nyaman dan Sebagian tidak nyaman” karena suhunya dingin dan lembab berkisar 27 % atau 100 hari dalam setahun. c). Sisanya sekitar 45 % atau 163 hari dalam setahun, kondisi Kota Semarang “ Tidak nyaman dan Sebagian tidak nyaman” karena suhunya terlalu panas dan kering.

Konsep Greencity Kota Semarang dapat dilakukan dengan program Ruang Terbuka Hijau atau Ruang Terbuka Air. Berdasarkan identifikasi fakta keberadaan RTH dan RTA pada tahun 2002 dan 2006, maka luasan ruang terbuka hijau dan air di Kota Semarang cukup memadai, yaitu sekitar 61.22 % (2133.067 ha) dan 55.83 % (1945.309 ha). Meskipun secara kuantitas luasan RTH tersebut memenuhi, tetapi peranan RTH belum dapat tercapai secara kualitas karena persebaran RTH dan RTA yang tidak merata.

Secara formulasi kebutuhan ruang terbuka hijau/air sangat tergantung pada jumlah penduduk dan jumlah kendaraan bermotor di Kota Semarang. Berdasarkan jumlah penduduk dan jumlah kendaraan bermotor di Kota Semarang, maka kebutuhan ruang terbuka hijau/air untuk Kota Semarang pada tahun 2002 – 2006 berkisar antara 33-36 % atau sekitar 1155-1240 ha.

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang, luasan RTH ditetapkan minimal 30 % dari total luas wilayah. Dari 16 kecamatan yang terdapat di Kota Semarang, terdapat delapan kecamatan yang belum memenuhi ketentuan RTH, antara lain Gajah Mungkur (7,48 %), Candisari (6,26 %), Pedurungan (24,18 %), Gayamsari (19,21 %), Semarang Timur (9,54 %), Semarang Utara (9,47 %), Semarang Tengah (11,9 %) dan Semarang Barat (27,9 %).

DAFTAR PUSTAKA

- Attwell, K. 2000. Urban land resources and urban planting-Case studies from Denmark. *Elsevier-Landscape and Urban Planning* 52: 145-163.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Propinsi Jawa Tengah. 2000. Penelitian Karakteristik Rowo Pening.
- BPS, Kabupaten Semarang Dalam Angka 2003, 2005 dan 2010
- BPS, Produk Domestik Regional Bruto 1998-2002, 2003.
- Dinas SDA. 2003. *Sistem Pengelolaan Air Rawapening*.
- ESRI Australia – GIS for Everyone. 2003. Parare A New Era in Digital Mapping. www.esriau.com.au/about/succstor/parare.asp.
- Hagget, P. 2001. *Geography A Global Synthesis*. Prentice Hall, New York.
- High-Tech"Nano"logy di Kota Semarang Tahun 2030 dengan Tenaga Surya, <http://snairrians.blogspot.com/2009/01/high-technanology-di-kota-semarang.html>
- I' Anah. 2005. *Analisis Kebutuhan Hutan Kota Sebagai Penyerap Emisi Gas CO₂ di Kota Semarang*. Geografi FIS, Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Kimpraswil. 2003. *Profil Penataan Ruang Propinsi Jawa Tengah*.
- Lab. Perencanaan Lanskap-Departemen Arsitektur Lanskap. 2005. *Ruang Terbuka Hijau Wilayah Perkotaan*. Departemen Arsitektur Lanskap. Fakultas Pertanian-IPB, Bogor
- Michael N. Demers, *Fundamentals Of Geographic Information System*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1997
- Prahasta, E. 2001. *Konsep-konsep Dasar Sistem Informasi Geografis*. Informatika, Bandung.
- Robert Laurini, R. and D. Thomson. 1992. *Fundamental Of Spatial Information System*. Academic Press, USA.
- Sandy, I.M. 1996. *Geografi Regional Republik Indonesia*. Jurusan Geografi FMIPA-UI, Jakarta.
- Sandy, I.M., D. Ludiro, S. Armawiasa. 1996. *Geomorfologi Terapan*. Jurusan Geografi FMIPA-UI, Jakarta.
- Setyowati, D.L. 2008. Iklim Mikro Dan Kebutuhan Ruang Terbuka Hijau di Kota Semarang. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan* 15 (3): 125-140.
- Sudha, P., N.H Ravindranath. 2000. A Study of Bangalore urban forest. *Elsevier-Landscape and Urban Planning* 47: 47-63.

- Svensson, M.K., I. Liasson. 2002. Diurnal Temperature In Built – Up Areas In Relation to Urban Planning. *Elsevier-Landscape and Urban Planning* 61: 37-54.
- Takahashi, K., H. Yoshida, Y. Tanaka, N. Aotake, F. Wang. 2004. Measurement Of Thermal Environment in Kyoto City and it's Prediction by CFD Simulation. *Elsevier-Energy and Building* 36: 771-779.
- Thompson, C.W. 2002. Urban open space in the 21th century. *Elsevier-Landscape and Urban Planning* 60: 59-72.
- Werdiningsih, H. Studi pola ruang terbuka hijau di lingkungan perumahan Semarang- Studi Kasus Lingkungan Perumahan Graha Taman Bunga BSB. *ENCLOSURE* 6 (2). pp. 87-96.
- Weber, C. 2003. Interaction Model Application For Urban Planning. *Elsevier-Landscape And Urban Planning* 63: 49-60.

OZON PERMUKAAN TERPANTAU DI KOTA PADANG (0°53'42S, 100°20'48E) SUMATERA BARAT, INDONESIA

Asep Firman Ilahi^{1*}, Aulia Rinadi¹, dan Ahmad Fauzi²

ABSTRACT

Preliminary study of surface ozone monitoring at Padang has been done. Monitoring period was conducted from July 2008 to July 2009. Within this period, the average concentration of surface ozone at Padang is 9.97 ppb_h, with maximum and minimum concentration are 0.2 and 60.9 ppb_h, respectively. High concentration was due to intense anthropogenic activity during the day time from vehicles and industries. Meanwhile, ozone concentration in the night is measured lower. It was also obtained that meteorological parameters in Padang are positively correlated with the concentration trend.

Keywords: surface ozone, Padang, meteorological parameters.

PENDAHULUAN

Pengamatan ozon permukaan (tropospheric ozon) di Sumatera Barat khususnya telah dimulai sejak tahun 1996 di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, bahkan hal ini merupakan yang pertama dalam sejarah institusi BMKG. Sejalan dengan waktu, dirasakan perlunya diketahui kadar ozon permukaan di tempat lain di Sumatera Barat juga. Pengamatan dimaksud dirintis melalui kerja sama antara BMKG dengan Universitas Negeri Padang. Dalam kesepahaman itu tercantum BMKG menyediakan peralatan pemantau dan UNP menyediakan sumber daya manusia untuk mengoperasikan peralatan. Instalasi dilakukan dengan Fakultas MIPA jurusan Fisika, dan peralatan pemantau diletakkan di lantai IV gedung laboratorium fisika UNP Padang. Sejak instalasi pertama pada tanggal 23 Juli 2008, alat bekerja memantau konsentrasi ozon permukaan pada ketinggian inlet sekitar 20 meter dari permukaan tanah.

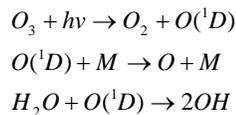


Gambar 1. Peta lokasi pengamatan ozon permukaan di Sumatera Barat (kota Padang dan Bukit Kototabang).

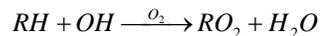
1. Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang
*e-mail: asef.firman@bmgk.go.id
2. Jurusan Fisika - Universitas Negeri Padang

Secara geografis daerah Padang sendiri merupakan daerah dataran rendah dengan ketinggiannya sangat bervariasi, yaitu antara 0-1853 m di atas permukaan laut dengan daerah tertinggi adalah Kecamatan Lubuk Kilangan. Tingkat curah hujan Kota Padang mencapai rata-rata 405,58 mm perbulan dengan rata-rata hari hujan 17 hari per bulan pada tahun 2003. suhu udaranya cukup tinggi yaitu antara 23°-32° C pada siang hari dan pada malam hari adalah antara 22 -28 C. Kelembabannya berkisar antara 78-81 persen. (<http://www.padang.go.id/>).

Kehadiran konsentrasi ozon yang tinggi dalam kabut asap (smog) pertama kali ditemukan di Los Angeles pada tahun 1950an. Percobaan dalam kamar laboratorium pada waktu itu memperlihatkan bahwa ozon terbentuk oleh reaksi fotokimia yang terjadi di atmosfer akibat hidrokarbon dan NO_x yang dikeluarkan dari kendaraan. Mekanisme ini menjelaskan kenapa konsentrasi ozon sering lebih tinggi pada area angin turun di daerah urban ketimbang pada daerah urban itu sendiri. Produksi ozon di daerah tercemar dimulai oleh produksi HO_x (Daniel J. Jacob,1999):

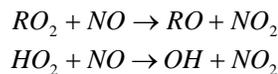


Dan diperbanyak dengan adanya reaksi OH dengan hidrokarbon. Oksidasi ini menghasilkan suatu peroksi organik radikal RO₂:

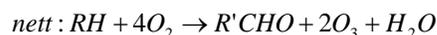


Relatif lebih penting dari hidrokarbon berbeda yang menyebabkan rekasi seperti di atas, hanya dapat diamati dengan syarat kuantitatif dan reaktifitasnya dengan OH. Reaktifitas biasanya bertambah dengan ukuran hidrokarbon, karena jumlah besar ikatan C-H tersedia untuk pemisahan atom H oleh OH; sejumlah besar alkana dan hidrokarbon tak jenuh cukup untuk memenuhi syarat untuk mendominasi CO dan CH₄ sebagai endapan dari OH, sebagaimana proses yang terjadi pada troposfer.

Hasil RO₂ radikal di atas berreaksi dengan NO menghasilkan NO₂ dan suatu oksid-radikal organik RO:



Kandungan karbonil R'CHO dapat juga ter-fotolisis menghasilkan HO_x atau berreaksi dengan OH melanjutkan pengandaan rantai. Jumlah akhir adalah :



Reaksi terhenti dengan hilangnya HO_x radikal. Kehilangan ini terjadi dikarenakan oleh dua cara. Ketika konsentrasi NO_x tidak terlalu tinggi, proksi radikal dapat berreaksi sendiri malahan dengan NO menghasilkan peroksida dan kandungan teroksidasi lain.

Peranan Cuaca Pada Kualitas Udara Ozon

Pada troposfer, udara dekat permukaan lebih hangat. Masa udara hangat biasanya akan naik dan masa udara dingin turun menyebabkan masa udara bercampur, mengakibatkan polutan dekat permukaan menyebar. Bagaimanapun, jika masa udara lebih dingin menyelimuti udara hangat maka tidak terjadi pencampuran, masa udara akan stabil atau stagnan. Daerah/lapisan dimana temperatur terjebak dinamakan lapisan inversi. Sebuah tipe inverse sering muncul berkali-kali ratusan meter di atas permukaan dan membatasi dispersi vertical polutan pada siang hari. Tipe lain inversi sering muncul pada sore hari dekat permukaan dan membatasi polutan pada jarak puluhan meter pada malam hari.

Ozon permukaan terbentuk sebagai hasil dari reaksi polutan yang lain, konsentrasi tertinggi sering terjadi pada sore hari. Reaksi fotokimia yang membentuk ozon biasanya membutuhkan waktu beberapa jam setelah emisi substansial *Volatile Organic Compounds* (VOC), dimana akan efektif ketika sinar matahari secara intens menyinari permukaan dan suhu udara hangat. Konsentrasi ozon di California biasanya tinggi pada musim panas. Angin pada siang hari di musim panas berasal dari lautan, membawa udara relatif bersih dari samudra menuju daratan, tetapi selanjutnya membawa emisi prekursor ozon di daratan.

Dengan langit cerah dan inversi suhu yang membatasi dispersi vertikal polutan, emisi ini dirubah menjadi ozon, dengan konsentrasi tertinggi sering terjadi pada jarak beberapa puluh mil dari angin vertikal (angin turun) daerah urban. Selama periode tahun dimana sinaran matahari cukup intens, banyak daerah di California mengalami inversi dengan frekuensi tinggi, relatif lebih rendah dan angin serta curah hujan yang rendah pula. Oleh karena itu, tidak ada negara bagian lain mempunyai hari-hari dalam tahun dengan temperatur tinggi seperti ini untuk konsentrasi ozon yang tidak menyehatkan ini (Seinfeld, 1998).

Variasi Spasial Konsentrasi Ozon

Konsentrasi ambien ozon permukaan dapat bervariasi dari yang tidak terdeteksi dekat sumber-sumber pembakaran -dimana oksida nitrat (NO) dikeluarkan ke udara-, hingga beberapa ratus parts per billion (ppb) udara di area VOC dan emisi NO_x. Pada daerah daratan yang jauh dari efek antropogenik, konsentrasi ozon biasanya 20 - 40 ppb. Di daerah pusat urban, konsentrasi lebih tinggi, biasanya 50 - 80 ppb, bahkan dapat mencapai 100 - 200 ppb. Di daerah angin turun (*downwind*) urban dan suburban, konsentrasi ozon dapat mencapai lebih 100 ppb, tetapi puncaknya pada saat beberapa jam sebelum deposisi dan reaksi dengan emisi NO, yang menyebabkan konsentrasi berkurang (Finlayson-Pitts and Pitts, 2000; Seinfeld and Pandis, 1998; Chameides, 1992).

Konsentrasi ozon bervariasi dalam banyak cara dikarenakan formasi fotokimianya, penghancuran oleh NO, dan efek rasio di udara antara VOC/ NO_x yang berbeda. Suatu rasio yang tinggi dari emisi NO_x terhadap VOC biasanya menyebabkan puncak konsentrasi ozon menjadi lebih tinggi dan konsentrasi minimum menjadi lebih rendah, dibandingkan terhadap kondisi daerah latar (*background*). Puncak konsentrasi ozon biasanya lebih tinggi pada daerah pusat urban. Angin lemah membawa molekul ozon dari pusat urban, dan reaksi fotokimia menciptakan ozon dari emisi urban VOC dan NO_x. Juga, jauh dari sumber emisi NO_x, sedikit NO dapat menghancurkan ozon. Karena waktu yang dibutuhkan dalam pergerakan, konsentrasi puncak ozon dalam area downwind terjadi kemudian dalam hari dibandingkan terhadap konsentrasi puncak di daerah urban.

Karena kekurangan NO penghancur ozon, ozon pada daerah rural cenderung berlangsung pada malam hari, penurunan hingga <30 ppb biasanya terjadi pada daerah urban dan suburban, yang mempunyai emisi NO yang cukup. Rasio puncak ozon terhadap konsentrasi ozon rata-rata khas lebih tinggi di area urban dan lebih rendah di daerah pedesaan. Dalam inversi permukaan yang biasanya terjadi pada malam hari, konsentrasi ozon dapat menjadi rendah. Pada daerah urban, emisi NO dekat permukaan biasanya mengurangi ozon di bawah 30 ppb. Pada daerah rural, bagaimanapun, emisi NO kurang lazim dan ozon malam hari dapat mencapai di atas 30 ppb.

Variasi Temporal Konsentrasi Ozon

Konsentrasi ozon ambien cenderung untuk bervariasi secara bertahap dengan pola aktivitas manusia, peningkatan konsentrasi ozon akan menghasilkan efek terhadap kesejahteraan dan kesehatan yang kurang baik. Konsentrasi ozon ambien meningkat sepanjang hari ketika tingkat pembentukan melebihi tingkat pembinasaaan, dan menurun pada malam hari ketika proses pembentukan tidak aktif. Variasi diurnal ozon tergantung pada lokasi, dengan puncak menjadi sangat tinggi untuk periode waktu yang singkat (durasi satu atau dua jam) di wilayah perkotaan, dan menjadi rendah dengan variasi diurnal yang relatif kecil di daerah remote. Di wilayah perkotaan, konsentrasi ozon mencapai puncak secara khas terjadi pada awal sore, tidak lama sesudah tengah hari ketika sinar matahari paling intens, tetapi tetap berlaku menjelang sore, terutama sekali tatkala transportasi terlibat. Sehingga, puncak periode ozon berkenaan dengan kota dapat disesuaikan dengan waktu ketika manusia terutama anak-anak, cenderung aktif di luar rumah.

Sebagai tambahan terhadap variasi sepanjang hari, konsentrasi ozon bervariasi selama mingguan. Pada tahun 1960-an, konsentrasi ozon yang paling tinggi pada banyak lokasi monitoring perkotaan cenderung terjadi pada tiap hari Kamis. Pola ini telah dipercaya untuk menjadi *carryover-ozone* dan pemicu ozon dari suatu hari ke hari berikutnya, menghasilkan suatu akumulasi ozon sepanjang minggu kerja. Di dalam 1980-an, konsentrasi ozon yang paling tinggi pada lokasi banyak orang cenderung untuk terjadi pada tiap hari Sabtu dan "efek akhir pekan ozon" menjadi suatu topik diskusi. Sejak itu, akhir pekan efek telah menjadi lazim pada banyak monitoring daerah perkotaan dan puncak ozon dalam minggu telah bergeser ke hari Minggu. Walaupun ozon konsentrasi sudah menurun sepanjang

minggu berkenaan dengan kendali emisi, mereka sudah menurun lebih cepat pada hari kerja dibanding pada akhir pekan. Makanya, periode puncak ozon mingguan sekarang cenderung bersamaan dengan akhir pekan, ketika lebih orang cenderung untuk keluar rumah dan aktif dibanding selama seminggu.

Penyebab "efek ozon akhir pekan" implikasinya mengenai strategi kendali ozon belum terpecahkan. Hampir semua data yang tersedia menghadirkan kondisi-kondisi pada di permukaan, di mana pembinasaan ozon oleh emisi NO segar merupakan suatu faktor utama yang mengendalikan konsentrasi ozon. Bagaimanapun, kebanyakan ozon terbentuk di awan, model kualitas udara yang digunakan untuk meneliti formasi ozon belum menunjukkan kemampuan untuk menggambarkan sistem pembentukan ozon pada lapisan tinggi dengan realisme cukup. Sebagai tambahan, beberapa proses fotokimia yang signifikan untuk digabungkan dalam simulasi model.

Juga, konsentrasi ozon dapat bervariasi dari tahun ke tahun sebagai jawaban atas kondisi-kondisi cuaca seperti El Niño dan variasi lain di dalam sistem tekanan udara global yang menaikkan kurang lebih dispersi emisi dibandingkan biasanya. Walaupun puncak konsentrasi ozon bervariasi dalam basis setahun demi setahun, puncak konsentrasi ozon di selatan California tengah menurun dalam suatu basis jangka panjang, sebagaimana emisi antropogenik VOC dan NOX sudah menurun. Bagaimanapun, sejak kehadiran revolusi industri, konsentrasi latar ozon global nampak seperti meningkat (Finlayson dan Pitts, 2000). Peningkatan ini mempunyai implikasi terkait kemampuan oksidatif atmosfer dan proses potensi pemanasan global (ozon merupakan suatu gas rumah kaca tetapi hadir pada konsentrasi yang rendah).

METODE PENELITIAN

Salah satu bagian pengembangan kerja sama antara BMKG dan beberapa PTN di Sumatra Barat adalah kegiatan memantau ozon permukaan di kota Padang. Peralatan yang digunakan adalah Ozone Analyzer produk Thermo Inc. Corp., USA type TE49 yang secara kontinu memantau konsentrasi ozon selama 24 jam dengan rata-rata data yang diambil adalah 10 menit-an. Alat ini dipasang di gedung Laboratorium Fisika UNP Padang lantai IV pada ketinggian inlet ± 25 meter dari permukaan tanah. Raw data yang dihasilkan kemudian dikonversikan ke dalam nilai ozon tak bias "unbiased ozon" dengan sensor tekanan yang di sesuaikan dengan persamaan :

$$X_{O_3} = \frac{([OA] + 0,26 \text{ ppb})}{1.010}$$

Di mana OA adalah raw data pembacaan dari *analyzer* dan X_{O_3} adalah nilai ozon tak bias. Sedangkan ketidak-pastian gabungan didapat dari :

$$u_{O_3} = \sqrt{(0,32 \text{ ppb}^2 + 2,65^{-05} * X_{O_3}^2)}$$

Dengan u_{O_3} adalah ketidakpastian gabungan untuk analyzer dan X_{O_3} adalah nilai ozon tak bias.

Periode waktu data yang diolah adalah data awal mulai alat beroperasi yaitu tanggal 23 Juli 2008 hingga 15 Juli 2009, dengan memisahkan data yang tidak baik akibat kesalahan prosedur maupun keadaan alam. Data kemudian dibuat rata-rata per jam (*hourly*) digabungkan dengan data cuaca permukaan yang didapat dari AWS Stasiun Meteorologi Tabing.

Pengolahan data dilakukan dengan mengumpulkan data pengamatan tiap 10 menit yang terrekam dalam data logger, yang bersama-sama terrekam data suhu kamar (T_{Lab}). Data yang akan diolah terlebih dahulu diplot untuk melihat apakah data berdistribusi secara normal, apabila data terlihat tidak normal, maka dipisahkan data outlier dari data yang akan diolah. Kemudian data dikonversi ke dalam nilai ozon tak bias, dan dirata-ratakan per jam dengan metode rata-rata biasa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

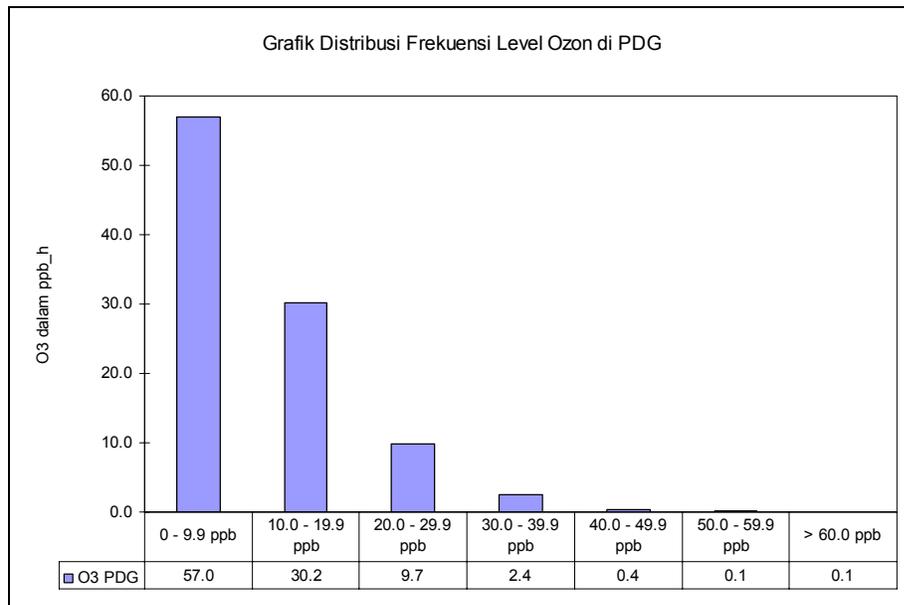
Data hasil pengamatan ozon permukaan yang tercatat dalam data *logger* mulai dari 23 Juli 2008 hingga 15 Juli 2009, dalam periode waktu ini terdapat beberapa celah data

pengamatan karena data tidak terrekam maupun data yang tidak lulus uji mutu. Ringkasan statistik hasil pengamatan dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini. Data yang diolah mempunyai 2486 baris data, dengan rata-rata 9,7 ppb_h, nilai tengah 7,9 ppb_h, minimum tercatat 0,2 ppb_h dan maksimum tercatat 60,9 ppb_h. Barisan data mempunyai penyimpangan standar 8,9 ppb_h, variansi 78,6 ppb_h dan kemencengan (*skewness*) 1,2 serta derajat kepercayaan untuk 95% sebesar 0,3.

Tabel 1. Deskripsi statistik pengamatan ozon di Padang dan di Bukit Kototabang, Sumatra Barat.

Deskripsi Statistik	O3corr Padang dalam ppb_h*)
Mean	9.7
Standard Error	0.2
Median	7.9
Mode	0.3
Standard Deviation	8.9
Sample Variance	78.6
Kurtosis	1.8
Skewness	1.2
Range	60.9
Minimum	0.2
Maximum	61.1
Sum	24105.1
N	2486
Confidence Level(95.0%)	0.3

*) ppb_h = *parts per billion hour*, perhitungan data dilakukan dalam basis data jam-jaman (*hourly based aggregate*).



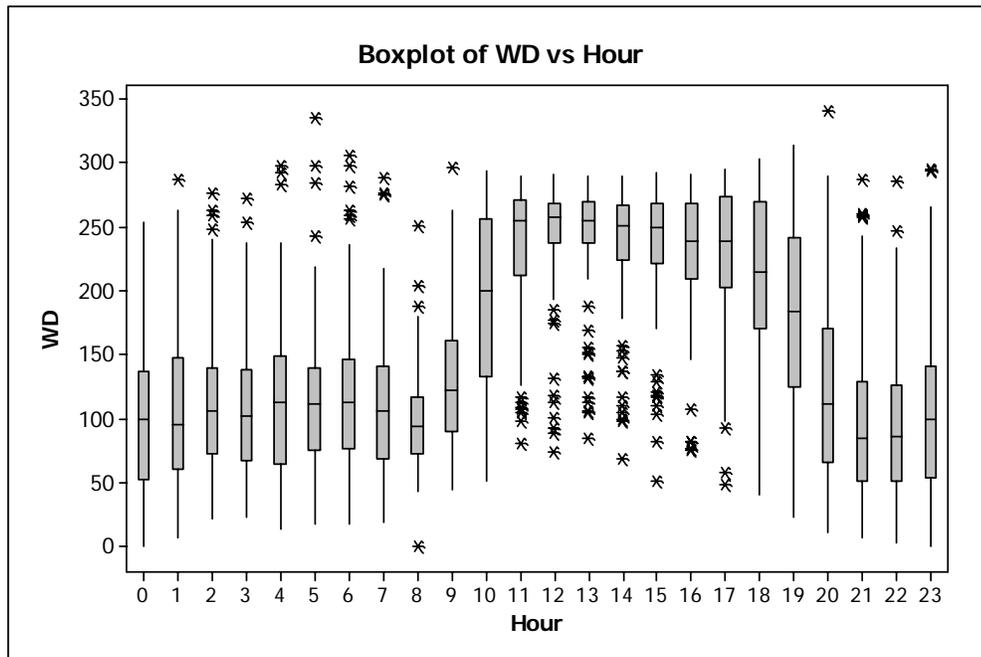
Gambar 2. Distribusi Frekuensi Level Ozon terdeteksi di Padang periode 2008 - 2009.

Untuk menganalisis keadaan ozon, penyebab dan sebaran ozon pada daerah urban seperti kota Padang ini, dibutuhkan analisis keadaan cuaca terutama angin permukaan, keadaan temperatur udara serta kelembaban udara. Dari data *Automatic Weather Station (AWS)* yang dimiliki Stasiun Meteorologi Tabing Padang (96163) diolah berdasarkan jam-jaman pada periode yang sama dengan data konsentrasi ozon permukaan. Data angin permukaan yang dihasilkan dari data AWS Tabing, merupakan data arah angin dalam derajat (0-360°) dan kecepatan dalam satuan meter/detik. Angin permukaan kemudian diklasifikasikan ke

dalam 8 kelas arah mata angin seperti yang tercantum dalam tabel 2 di bawah ini dimana C mengindikasikan arah mata angin *Calm*.

Tabel 2. Kelas klasifikasi 8 arah mata angin.

Arah Angin	Kelas arah angin
Calm	0°
N	337.6° – 22.5°
NE	22.6° – 67.5°
E	67.6° – 112.5°
SE	112.6° – 157.5°
S	157.6° – 202.5°
SW	202.6° – 247.5°
W	247.6° – 292.5°
NE	292.6° – 337.5°

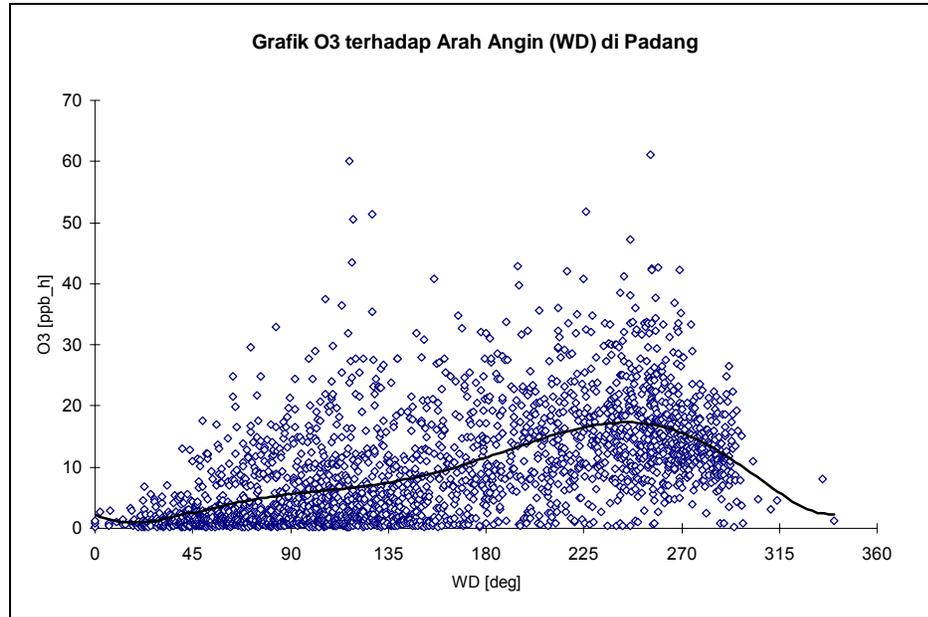


Gambar 3. Boxplot arah angin permukaan di Padang

Dari data AWS yang diolah dari Stasiun Meteorologi Tabing Padang, terlihat bahwa pola arah dipengaruhi oleh tipe angin periodik, dimana arah angin tipe daerah pantai mendominasi setiap harinya. Pada siang hari antara jam 10 sampai dengan jam 18 sore hari, arah angin didominasi oleh angin Baratan 200 – 280 derajat, sementara pada malam hari, angin timuran lebih dominan, angin bertiup antara 50 sampai dengan 150 derajat.

Analisis Ozon Berdasarkan Arah Angin

Pada gambar 4 di bawah ini memperlihatkan grafik keadaan konsentrasi ozon permukaan terhadap arah angin dalam satuan derajat, serta polinomial regresi orde 5 terhadap trend ozon berdasarkan arah mata angin. Terlihat bahwa konsentrasi ozon bervariasi terhadap arah mata angin, dimana sebaran distribusi ozon relatif maksimum berasal dari Barat Daya (SW). Sementara itu distribusi ozon relatif lebih besar berasal dari arah angin Timur hingga Selatan, dengan nilai relatif maksimum berasal dari Tenggara.

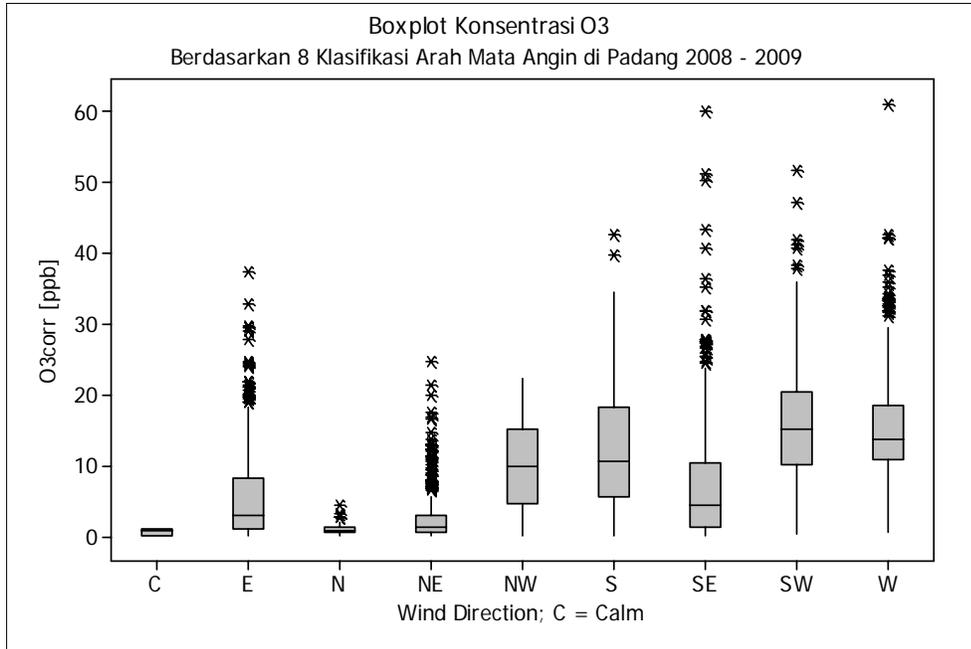


Gambar 4. Grafik konsentrasi ozon permukaan terhadap derajat arah angin.

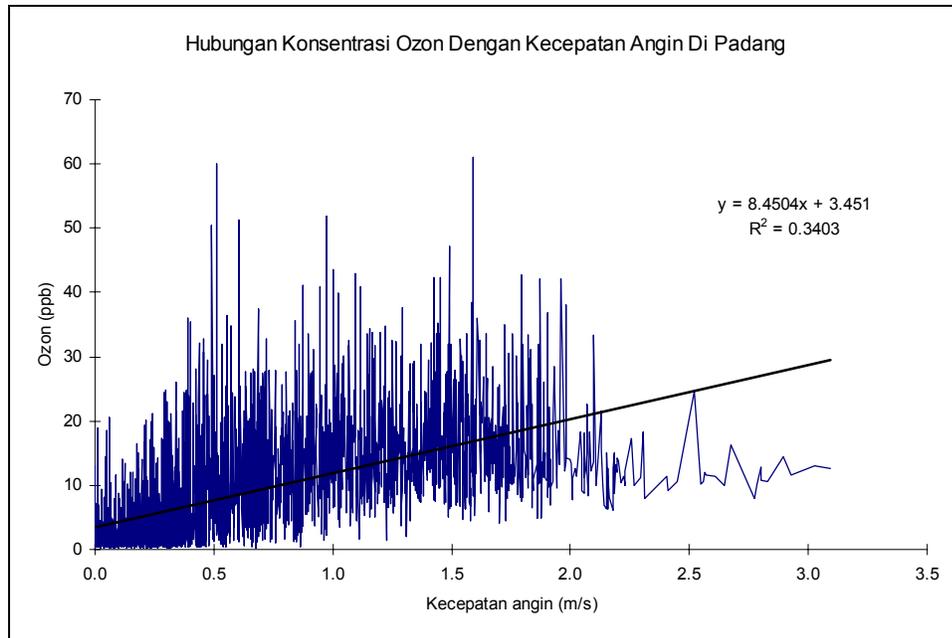
Sementara itu, Gambar 5 memperlihatkan ringkasan populasi konsentrasi ozon permukaan berdasarkan kategori arah mata angin seperti yang diterangkan dalam Tabel 1. Terlihat bahwa nilai tengah konsentrasi ozon tertinggi berasal dari arah Barat Daya, tertinggi selanjutnya adalah berasal dari Barat, Selatan dan Barat laut. Variasi terbesar nampak berasal dari arah Tenggara, terlihat nilai-nilai *outlier* mulai dari 25 ppb_h sampai 60 ppb_h. Sementara itu, arah angin dari Barat membawa pengaruh terhadap konsentrasi ozon terdeteksi mempunyai nilai tengah lebih rendah, tetapi variasi outlier sangat besar sekali. Di lain pihak, angin-angin dari Utara dan Timur Laut, nampak sangat kecil membawa polutan ozon terdeteksi di Padang.

Dinamika atmosfer di atas kota Padang, telah memberikan potensi yang besar pada pembentukan ozon akibat adanya prekursor pembentuk ozon dari kegiatan manusia pada siang hari. Walaupun arah angin dominan pada siang hari berasal dari Baratan, dimana sebelah Barat kota Padang merupakan lautan terbuka, tetapi konsentrasi ozon permukaan nampak lebih tinggi ketimbang pada pada malam hari ketika terjadi angin Timuran. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada pengaruh *long-range transport* polutan dari tempat yang sangat jauh, konsentrasi yang tinggi adalah akibat dari polutan prekursor ozon hasil dari kegiatan manusia pada malam hari.

Hubungan kecepatan angin dengan konsentrasi ozon permukaan dapat terlihat pada Gambar 6 berikut. Terlihat juga persamaan regresi linear kecepatan angin terhadap konsentrasi ozon menunjukkan R^2 sebesar 0,34 hal ini mengindikasikan bahwa ada korelasi positif dengan makin kencangnya kecepatan angin maka berkontribusi 34% terhadap kenaikan konsentrasi ozon permukaannya. Lebih teliti lagi melihat pada gambar tersebut, apabila tidak memakai persamaan garis lurus, akan nampak pola yang jelas terhadap kenaikan ozon akibat kenaikan kecepatan angin. Pada kecepatan angin Calm (tidak ada angin), konsentrasi terukur biasanya udara ambien murni di sekitar tempat pengamatan, terlihat konsentrasi ozon bervariasi dari 0,2 hingga 18,9 ppb dengan rata-rata 1,9 ppb. Untuk kecepatan angin dari 0,5 hingga 2 m/s, konsentrasi ozon bervariasi antara 0,2 hingga mencapai maksimum 61,1 ppb dengan rata-rata 10,2 ppb, tetapi apabila kecepatan angin bertambah kencang >2.0 m/s, konsentrasi terukur maksimum tidak lebih dari 20 ppb.



Gambar 5. Box plot konsentrasi ozon permukaan berdasarkan arah mata angin permukaan.



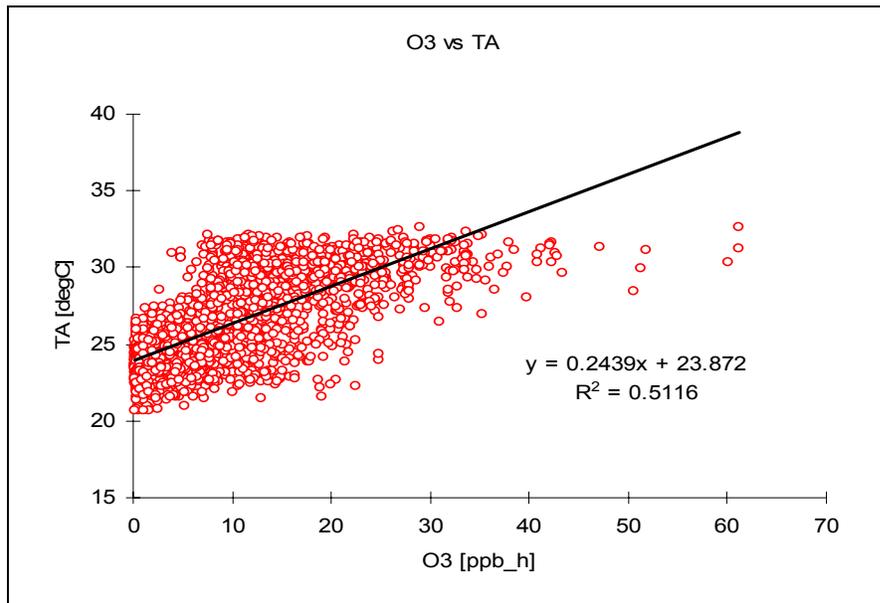
Gambar 6. Hubungan konsentrasi ozon permukaan dengan kecepatan angin di Padang.

Kecepatan angin permukaan seperti halnya arah angin, mengikuti pola angin periodik. Pada malam hari antara jam 19.00 – 07.00 kecepatan angin bervariasi dari 0 hingga 0,05 m/s, diaman kecepatan seperti ini dapat dikategorikan dalam angin lemah. Sementara pada siang hari antara jam 8 hingga 18 WIB, kecepatan bervariasi dari 0,6 m/s hingga mencapai maksimum >3 m/s. Konsentrasi ozon permukaan terdeteksi pada malam hari bukan akibat dari rendahnya lapisan pencampuran ataupun tidak adanya radiasi matahari yang memungkinkan terjadinya proses pembentukan. Pada malam hari konsentrasi yang terdeteksi biasanya masih dari akibat masih adanya gas prekursor ozon NO_x atau terjadinya sink dari atmosfer tinggi. Sementara itu pada siang hari, walaupun kecepatan angin tinggi dan berasal dari laut, tetapi konsentrasi cenderung masih tinggi pula, hal ini

mengindikasikan bahwa pembentukan konsentrasi ozon tinggi di kota Padang adalah akibat dari tingginya gas-gas prekursor dari kegiatan penduduk pada siang hari.

Analisis Ozon Berdasarkan Temperatur Udara

Suhu permukaan akan mempengaruhi langsung terhadap konsentrasi ozon permukaan. Sebagaimana proses alamiah fotokimia atmosfer, pembentukan ozon membutuhkan sinar matahari pada panjang gelombang efektif 254 nm. Gambar di bawah ini memperlihatkan pengaruh suhu permukaan terhadap konsentrasi ozon permukaan.



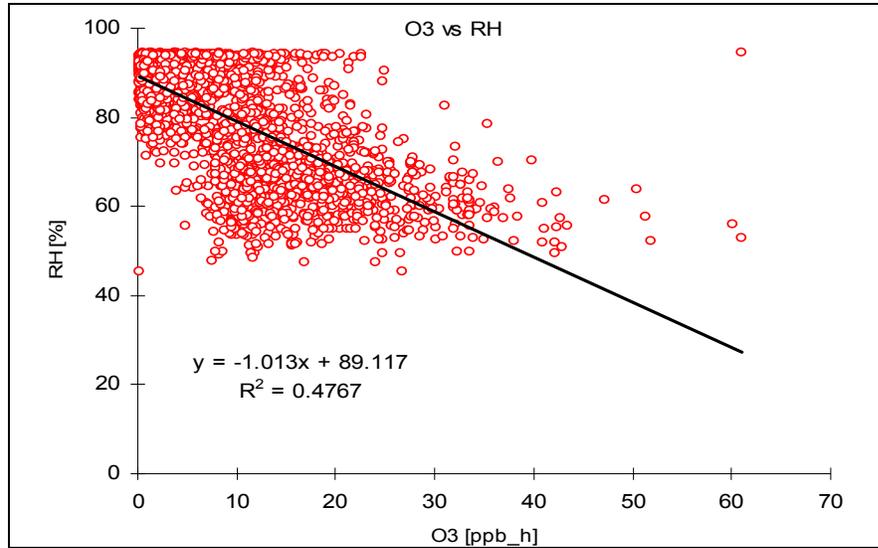
Gambar 7. Hubungan konsentrasi ozon permukaan terhadap temperatur udara ambien.

Pada gambar di atas terlihat garis regresi linear ozon terhadap suhu dengan nilai R^2 0,5, mengindikasikan ada pengaruh signifikan kenaikan suhu terhadap kenaikan konsentrasi ozon permukaan. Pada suhu udara 21°C – 27°C atau biasanya pada malam hari, ozon terdeteksi bervariasi antara 0 hingga 25 ppb, tetapi pada suhu di atas 27°C, ozon bervariasi antara 5 hingga 61 ppb, dan ini terjadi pada siang hari.

Radiasi matahari pada siang hari lebih intens membuat udara di sekitar permukaan bumi lebih hangat ketimbang di daerah laut (perairan). Radiasi matahari dengan panjang gelombang tertentu (254 nm atau radiasi gelombang α) efektif membantu terjadinya pelepasan energi ($h\nu$) pada penghancuran ozon dan juga membantu dalam pembentukan molekul ozon di atmosfer. Pada siang hari, terlihat konsentrasi ozon sangat tinggi seiring dengan kenaikan temperatur udara permukaan. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu udara akibat radiasi matahari cenderung membuat konsentrasi ozon tinggi.

Analisis Ozon Berdasarkan Kelembaban Udara

Hubungan ozon terbalik nampak pada parameter cuaca kelembaban (Gambar 8). Dengan nilai regresi R^2 sebesar 0,47 mengindikasikan bahwa ada kenaikan konsentrasi ozon permukaan dengan turunnya nilai kelembaban. Pada kelembaban udara 45% hingga 75%, konsentrasi ozon bervariasi dari 5 hingga 61 ppb, sementara itu kelembaban udara >75%, konsentrasi ozon bervariasi antara 0 hingga 20 ppb. Kelembaban udara permukaan cenderung berbanding terbalik terhadap temperatur udara. Begitu juga analisis pengaruhnya terhadap konsentrasi ozon permukaan terukur nampak berbanding terbalik sebagaimana pengaruhnya suhu terhadap ozon permukaan. Pada siang hari biasanya suhu udara lebih hangat dari pada malam hari, tetapi kelembaban udara pada siang hari lebih rendah ketimbang pada malam hari. Dengan kelembaban rendah, memungkinkan pelepasan dan penangkapan energi pembentukan molekul ozon pada siang hari cenderung lebih kuat ketimbang pada malam hari dimana kelembaban tinggi.

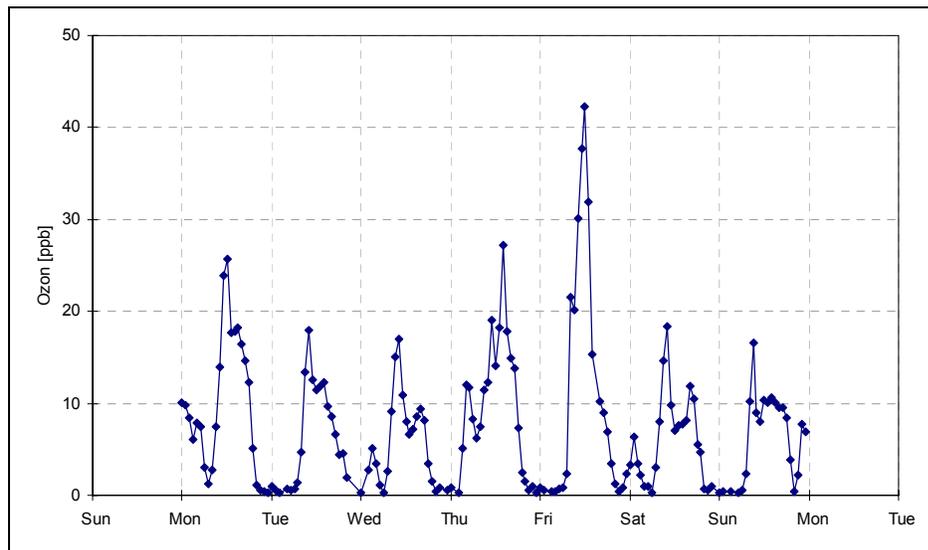


Gambar 8. Hubungan konsentrasi ozon permukaan terhadap kelembaban udara.

Analisis Spasial Konsentrasi Ozon

Gambar 9 di bawah ini memperlihatkan variasi spasial mingguan konsentrasi ozon permukaan di kota Padang. Pada hari Senin konsentrasi maksimum berkisar pada 25 ppb, sementara hari Selasa, Rabu, Sabtu dan Minggu mempunyai pola yang hampir sama, tetapi konsentrasi mulai naik menjelang hari Kamis dan mencapai maksimum pada hari Jum'at yang dapat terdeteksi hingga di atas 40 ppb.

Pola kegiatan masyarakat kota Padang secara siklus mingguan memang nampak sangat jelas. Masyarakat kota Padang memulai aktifitas pekan pada hari Senin, kegiatan industri, anak sekolah, pekerja kantor, buruh dan lain-lain, sehingga lalu lintas memang cenderung padat pada hari Senin. Sementara pada hari Selasa dan Rabu kegiatan masyarakat cenderung stagnan, namun tak seperti pada hari sebelumnya, masyarakat masih sangat antusias mengawali awal pekan. Pada hari Kamis, aktifitas nampak lebih tinggi dari hari sebelumnya, terlihat konsentrasi ozon cenderung lebih tinggi dari hari sebelumnya. Aktifitas paling sibuk nampaknya terjadi pada hari Jumat, kemungkinan masyarakat menjelang akhir pekan membuat aktifitas lebih sibuk dari sebelumnya. Sementara itu aktifitas masyarakat kota Padang pada hari Sabtu dan Minggu cenderung menurun, dikarenakan sebagian masyarakat kota Padang mengisi waktu liburnya dengan pergi keluar kota.

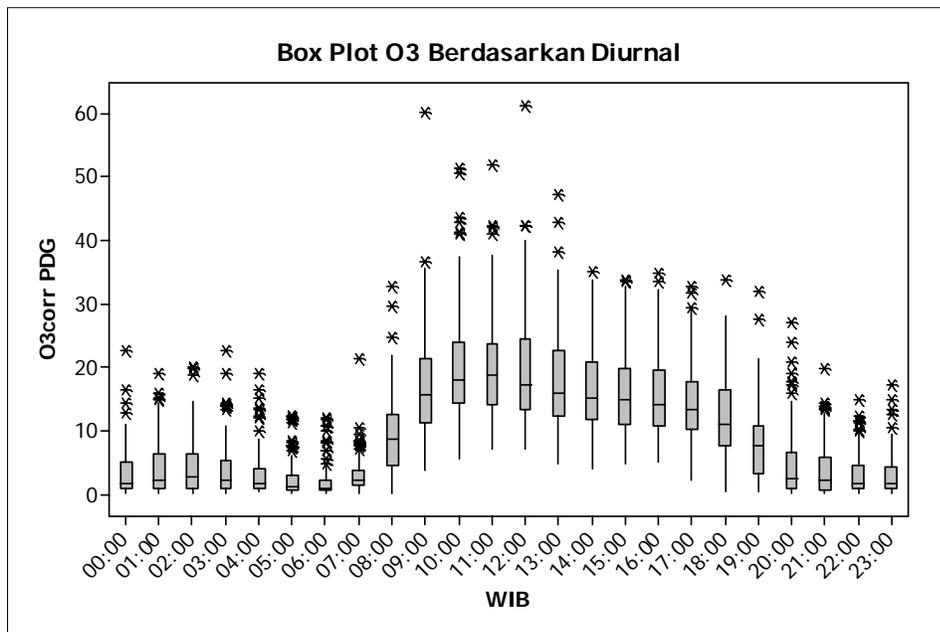


Gambar 9. Variasi Spasial Mingguan Konsentrasi ozon permukaan terukur di Kota Padang.

Analisis Temporal Konsentrasi Ozon

Variasi temporal (diurnal) konsentrasi ozon permukaan terlihat pada Gambar 10 di bawah ini. Ozon pada siang hari terlihat mulai intens pada jam 08.00 dan mencapai maksimum pada jam 10 hingga 12 siang. Kemudian bergerak turun secara perlahan hingga mencapai minimum pada siang hari yaitu pada jam 18.00. Sementara pada malam hari ozon mempunyai variasi minimum pada jam 06.00 pagi hari, dan bervariasi antara 0 hingga 20 ppb. Konsentrasi maksimum siang hari mencapai 61 ppb terjadi pada jam 12 siang, dan minimum terendah pada jam 6 pagi.

Pola temporal ozon permukaan di kota Padang cenderung lebih tinggi pada siang hari ketimbang pada malam hari. Indikasi yang logis untuk pola seperti ini memang aktifitas masyarakat lebih tinggi pada siang hari daripada pada malam hari. Penggunaan kendaraan, ditengarai telah membuat konsentrasi tinggi. Hasil keluaran dari asap kendaraan bermotor berupa NO_x, CO dan CO₂ menjadi prekursor pembentukan ozon permukaan pada siang hari. Selain itu, kondisi geografis kota Padang sendiri dengan pola angin diurnal berupa pola periodik, memungkinkan polutan yang terbawa ke lautan, terbawa kembali ke daratan pada siang hari. Sementara pada malam hari nampak konsentrasi terukur masih di atas 0 ppb-h, kegiatan industri yang berjalan 24 jam perhari, memungkinkan telah menyebabkan gas prekursor dikeluarkan ke atmosfer. Pada malam hari juga sangat mungkin terjadinya proses subsidensi akibat penurunan suhu permukaan yang menyebabkan udara turun dari tropofer tinggi ke permukaan, biasanya gas N₂O (dinitrogen dioksida) terbawa hingga ke permukaan.



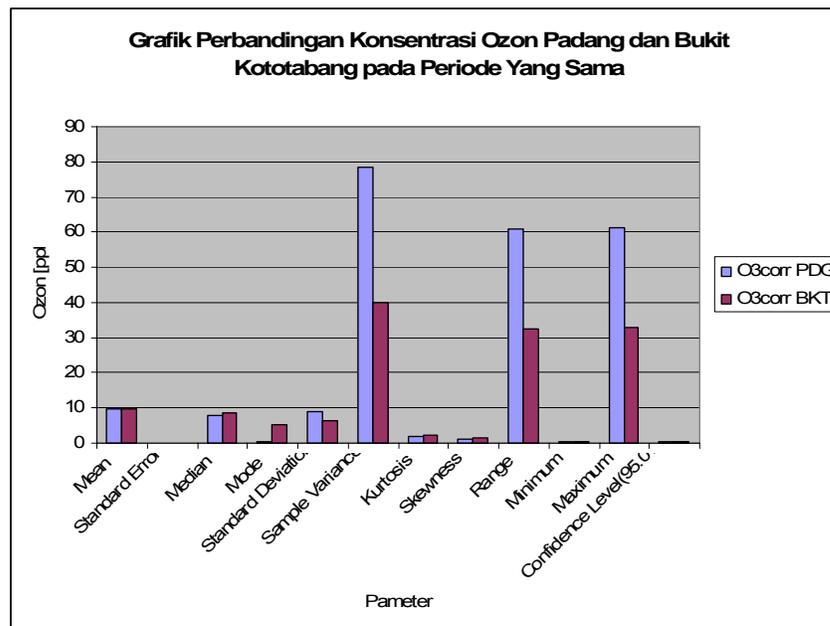
Gambar 10. Box Plot konsentrasi ozon permukaan terukur berdasarkan variasi diurnal.

Pengamatan ozon di Sumatra Barat telah dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Karakteristik geografis kedua tempat sangat berbeda satu sama lain, dimana kota padang merupakan daerah urban sementara Bukit Kototabang merupakan daerah remote pegunungan yang relatif masih sangat sedikit pencemarannya. Pada periode yang sama, telah dibandingkan ringkasan statistik data hasil pengamatannya seperti nampak pada Gambar 11. Kota Padang dengan kondisi geografis berada dekat pantai dan berpopulasi cukup tinggi dapat dikategorikan daerah urban, sementara Bukit Kototabang dengan kondisi geografis berada pada ketinggian 865 meter di atas permukaan laut, berada di atas bukit Barisan dapat dikategorikan sebagai daerah rural/remote (pedesaan), dimana populasi penduduk di sekitar lokasi Bukit Kotoabang relatif sedikit.

Konsentrasi ozon yang terpantau di kedua lokasi yang berbeda ternyata mempunyai nilai tengah yang hampir sama yaitu 9,7 ppb di Padang dan 9,8 ppb di Bukit Kototabang namun pada nilai tengah terlihat perbedaan yang signifikan dimana kota Padang mempunyai

median 7.9 ppb lebih rendah dari Bukit Kototabang yang mempunyai nilai 8.5 ppb. Perbedaan yang sangat besar nampak pada variansi kedua pengamatan, dimana variansi di kota Padang jauh lebih besar dari Bukit Kototabang. Perbedaan yang lain yang sangat mencolok yaitu pada range sebaran datanya dan nilai maksimum kedua pengamatan. Kota Padang mempunyai variansi yang sangat besar dikarenakan *range* cakupan datanya jauh lebih besar dari Bukit Kototabang sehingga tak heran apabila melihat perbedaan ini dikarenakan nilai maksimum dan minimum di kedua pengamatan yang berbeda. Nilai maksimum di kota Padang tercatat 61 ppb sementara di Bukit Kototabang hanya berkisar pada angka 32 ppb.

Konsentrasi terukur di kota Padang pada periode yang sama dibandingkan dengan Bukit Kototabang memberikan gambaran bahwa kondisi ozon permukaan di Sumatera Barat khususnya relatif sama. Hal ini terlihat pada nilai rata-rata ozon permukaan pada periode yang sama ternyata hampir sama. Perbedaan yang dapat disimpulkan dari kedua tempat ini adalah bahwa cakupan range (jangkauan) ozon terdeteksi di kota Padang lebih luas daripada di kota Padang dengan range 60,9 ppb ketimbang di Bukit Kototabang yang mempunyai range hanya setengah dari range kota Padang yaitu 32,3 ppb. Hal ini disebabkan karena kota Padang yang dengan kondisi geografis dan penduduknya merupakan daerah urban. Secara global untuk daerah lain di Sumatera Barat mungkin akan didapat nilai pengukuran yang akan relatif sama.



Gambar 11. Grafik Konsentrasi ozon permukaan terukur di Padang dan Bukit Kototabang pada periode yang sama.

KESIMPULAN

Pengamatan konsentrasi ozon sebagai polutan di daerah perkotaan kota Padang dalam kerangka kerja sama BMKG dengan Universitas di Sumatera Barat telah dilaksanakan pada tahun 2008 hingga 2009 di Universitas Negeri Padang (UNP). Pengamatan ini tidak berlanjut dikarenakan bencana alam gempa bumi tektonik yang melanda kota Padang pada bulan September 2009 lalu yang menyebabkan rusaknya sistem pada alat pengamatan. Dari rangkaian data hasil pengamatan, telah memberikan gambaran keadaan polutan ozon permukaan di daerah urban kota Padang, Sumatera Barat. Studi awal sumber yang mempengaruhi produksi ozon di kota Padang dicurigai sumber utamanya adalah dari sumber bergerak yaitu penggunaan kendaraan bermotor dan dari sumber titik yaitu kegiatan industri serta Pabrik Semen Padang. Kondisi cuaca atmosfer seperti angin, suhu dan kelembaban sedikit banyak telah membantu dalam proses terjadinya pembentukan dan penurunan konsentrasi ozon. Nilai ozon tinggi (>40 ppb) terjadi pada siang hari, sementara konsentrasi ozon minimal terjadi pada malam hari.

Dari perbandingan data ozon terpantau di Sumatera Barat, terlihat rata-rata ozon di kota Padang hampir sama dengan Bukit Kototabang yang telah melakukan pengamatan terlebih dahulu sejak 1996. Perbedaan cakupan data range yang sangat besar di kota Padang yang memberikan perbedaan yang signifikan terhadap keadaan ozon di Sumatera Barat. Hal ini tentu saja akibat perbedaan klasifikasi daerah itu sendiri, di mana kota Padang yang merupakan ibukota Sumatera Barat dengan populasi penduduk dan aktifitas yang beragam, sementara Bukit Kototabang merupakan daerah remote pegunungan. Dari hasil pengukuran ini dapat disimpulkan ternyata perbedaan tipe daerah di Sumatera Barat ini mempunyai rata-rata konsentrasi ozon yang relatif sama, hal ini berguna untuk menaksir jumlah kadar ozon di tempat lain di Sumatera Barat.

Dalam pengukuran ini, ozon merupakan gas polutansekunder, artinya keberadaannya di atmosfer merupakan hasil dari reaksi gas-gas polutan primer yang dikeluarkan ke atmosfer seperti NO_x , CO, CO_2 serta Hidrokarbon. Nilai konsentrasi ozon maksimum di kota Padang terlihat sangat tinggi dibandingkan dengan Bukit Kototabang, artinya konsentrasi polutan primer dapat ditaksir sangat tinggi, bahkan mungkin melebihi ambang batas pada periode tertentu. Untuk itu sangatlah diperlukan monitoring dari gas-gas primer secara kontinyu untuk mengetahui hubungan serta analisis pengaruh polusi di daerah perkotaan seperti kota Padang.

DAFTAR PUSTAKA

- Chameides, W. L. and Co-authors. 1992. Ozone Precursor Relationships In The Ambient Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 97, 6037-6055.
- Finlayson B.J., and J.J. Pitts. 1969. *Chemistry Of The Upper And Lower Atmosphere*. Academic Press, New York, pp. 2000.
- Jacob, D. J. 1999. *Introduction To Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Pemko Padang di <http://www.padang.go.id/>.
- Seinfeld, J.H., and S. N. Pandis. 1997. *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change*. John Willey, New York.
- Zellweger C., J. Klausen, and B. Buchmann. 2007. *System And Performance Audit of Surface Ozone And Carbon Monoxide at The Global Gaw Station Bukit Koto Tabang Indonesia*. WCC-Empa REPORT 07/1, 2007.

ABSTRACT

Flood event that occurred on the last days of January inundated some areas in Batam, Bintan, and Kundur, Riau Islands. It was caused by extreme rainfall that lasted for 3 days, 29-31 January 2011. Studies indicated that this extreme event related to strong northeastern monsoon in The South China Sea. MJO position in The Indian Ocean and easterly tradewind caused direct penetration of cold surge to the Southern Malacca Peninsular and Sumatra Island. Elevation of these regions was also causing convergence in the lower level.

Keywords: *flood, extreme rainfall, Riau Islands, MJO*

PENDAHULUAN

Hujan yang turun sejak Sabtu (29/1/2011) hingga Senin (31/1/2011), mengakibatkan simpang Bandara Hang Nadim Batam banjir. Ketinggian air mencapai 1 meter atau sebatas pinggang orang dewasa. Banjir ini terparah dan yang pertama selama ini terjadi di sekitar lokasi. Akibatnya sejumlah penerbangan tertunda karena penumpang dan kru penerbangan terhadang menuju terminal Bandara Hang Nadim (TRIBUNNEWSBATAM)

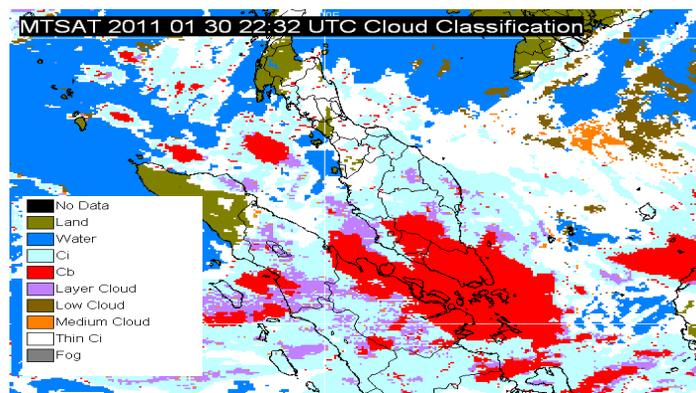
Tanjungpinang (ANTARA News) - Ruas jalan utama yang menghubungkan Tanjungpinang dengan Kabupaten Bintan di Km 13 arah Tanjung Uban, Bintan, Kepulauan Riau sempat terputus beberapa jam akibat tergenang banjir sepanjang 150 meter. "Kendaraan baru bisa melewati jalan yang digenangi banjir sekitar pukul 09.00 WIB, setelah genangan air di dua badan jalan mencapai setinggi paha orang dewasa sejak subuh surut (Antara News)

Banjir di 4 desa Pulau Kundur, Kabupaten Karimun, Provinsi Kepulauan Riau yang pada Senin (31/1) mencapai satu meter kini mulai surut dengan ketinggian air antara 30 hingga 50 centimeter. Demikian dikatakan Kholik, koordinator posko pengungsi di Masjid Akbar, Desa Tanjungsari, Kecamatan Kundur ketika dikonfirmasi, Selasa (1/2). Kholik mengatakan, ketinggian air saat ini sekitar 60 centimeter, susut sekitar 40 hingga 50 centimeter dibandingkan dua hari lalu (SIGAP)

Ilustrasi tersebut di atas menunjukkan bahwa dalam periode yang bersamaan, terjadi hujan lebat yang berlangsung lama di kawasan P. Batam, P. Bintan, dan P. Kundur kabupaten Karimun-Kepulauan Riau. Bisa disimpulkan bahwa hujan berasal dari kelompok awan hujan (*Cumulunimbus*) yang menutupi daerah yang luas seperti yang terlihat dari gambar citra satelit pada Gambar 2 (warna merah). Awan demikian hanya dapat terjadi bilamana terdapat daya angkat yang kuat yang mampu membawa parcel udara mencapai lapisan atmosfer cukup tinggi. Daya angkat ditimbulkan oleh konvergensi, factor topografi, dan konveksi.



Gambar 1. Banjir di Simpang Bandara Hang Nadim Batam (Sumber: Tribun).



Gambar 2. Citra Satelit MTSAT tanggal 30 Januari 2011 jam 05.30 wib.

Pola aliran angin, khususnya di lapisan 1 km di atas permukaan bumi (low level-wind) punya peranan kritis dalam kejadian cuaca. Tidak dipungkiri pemanasan matahari terhadap permukaan bumi merupakan fundamen gerakan udara. Pada saat belahan bumi utara musim dingin seperti saat sekarang, Asia Tengah menjadi gudang udara dingin. Sepanjang waktu, udara berhembus ke luar ke arah Asia Timur dan menuju samudra tropis yang hangat dan Australia.

Periode Desember – awal Maret, jantung daratan Asia mengalami suhu udara yang sangat rendah. Dari waktu ke waktu udara keluar dari Asia tengah, membawa perubahan mendadak ke wilayah Asia Timur yakni China dan semenanjung Korea. Udara dingin paling terasa di utara tetapi suatu waktu terjadi di sebelah selatan China, ditandai adanya hari dengan turunnya suhu udara sampai 5° C dari suhu udara sebelumnya. Seringkali udara keluar tersebut bersamaan juga dengan formasi sistem tekanan tinggi di China. Perbedaan tekanan membawa penambahan kecepatan angin timur laut di Laut China Selatan (cold surge) dan bertiup menuju kawasan tropis yang hangat dan bertekanan rendah. Laut yang hangat dan angin yang lembab dan konvergen menyebarkan hujan di wilayah tropis.

Kondisi *cold surge* aktif inilah yang berinteraksi dengan mode –mode system cuaca saat itu, seperti MJO, La Nina, IOD, dan kondisi synoptik ditengarai menjadi pemicu utama terjadinya cuaca sangat buruk di wilayah Kepri pada akhir Januari 2011.

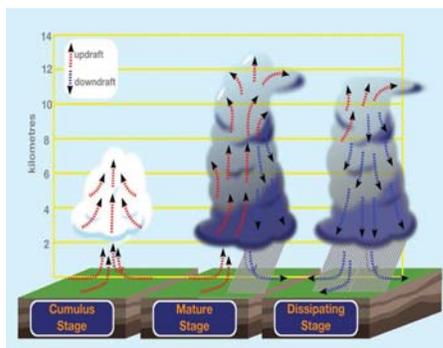
Pembentukan Awan dan Hujan

Saat arus udara yang berbeda jenis dari berbagai arah bertemu (konvergen), parcel udara memperoleh gaya angkat untuk bergerak ke atas. Akibat tekanan udara yang berkurang setiap naik ketinggian, parcel udara mengembang dan mendingin. Pada suatu saat uap air berkondensasi membentuk butir air berupa awan. Awan terus berkembang sehingga terbentuk butiran-butiran air yang besar (kristal es) dan jatuh dari awan berupa hujan.

Terdapat tiga pola aliran angin yang menyebabkan arus udara konvergen dan gerak udara ke atas:

- (a) Arus udara masuk menyatu membentuk pola bagai anah panah.
- (b) Terjadi perubahan penurunan kecepatan angin yang berlangsung singkat
- (c) Aliran udara masuk menuju ke pusat system tekanan rendah.

Bila konvergensi sangat kuat, udara dapat terangkat sangat tinggi. Terbentuk jenis awan thunderstorm (*Cumulunimbus*) yang bisa tumbuh mencapai ketinggian sekitar 8 dan 12 km. Suatu sel badai guntur yang matang ditandai oleh arus *updraft* dan *downdraft* yang kuat (gb.3). *Updraft* diasosiasikan dengan masuknya udara basah dari dasar awan. Ketika badai guntur matang, jatuhnya tetes hujan menghambat dan menekan udara naik sehingga kembali bergerak turun menimbulkan *downdraft*. *Downdraft* suatu saat terjadi di seluruh bagian dalam awan, memotong puncak kelembaban yang terbawa oleh *updraft*. Sel badai guntur selanjutnya menuju stage purnah. Sel badai guntur tunggal biasanya hidup kurang dari satu jam. Bila konvergen terjadi pada area yang luas, sel badai guntur baru bisa terbentuk, sehingga menambah panjang masa hidup episode badai guntur. Beberapa kasus, awan yang telah mendekati purnah biasanya menyebar mendatar ke dalam suatu lapisan awan (stratiform cloud) menghasilkan hujan terus-menerus.



Gambar 3. Fase pembentukan Badaiguntur.

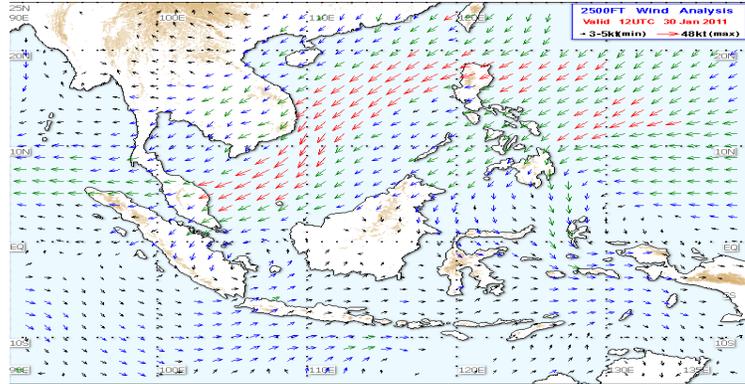
Udara juga bisa terangkat merambat di sisi depan ketinggian bukit/gunung. Proses lainnya adalah konveksi. Pada siang hari yang panas, radiasi matahari memanasi permukaan tanah yang selanjutnya terjadi pertukaran panas di lapisan udara di atasnya. Udara panas lalu bergerak naik dan menghasilkan awan konvektif.

Seruak Dingin (Cold Surge)

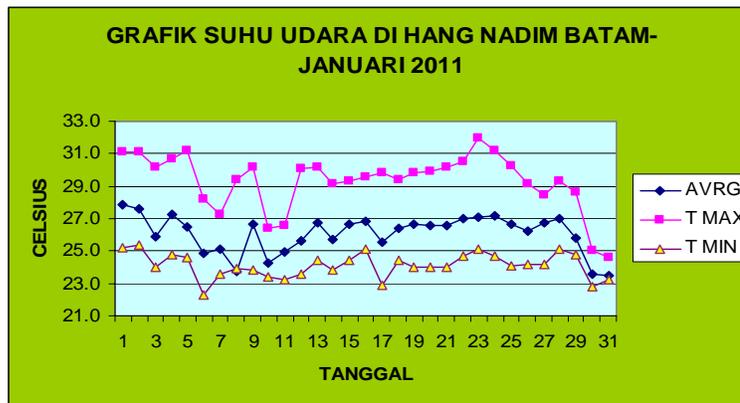
Bulan Januari merupakan bulan basah kedua di Kepri. Hujan lebat yang berlangsung beberapa hari berturut-turut, dan dalam beberapa kasus lebih dari satu minggu menyumbang total curah hujan dalam sebulan. Pada umumnya *rain spell* tersebut disebabkan adanya seruak dingin (*cold surge*) angin Monsun Timur laut di Laut China Selatan. Prosesnya dimulai saat udara dingin keluar dari Asia tengah, membawa perubahan mendadak ke wilayah Asia Timur yakni China dan semenanjung Korea. Udara dingin paling terasa di utara tetapi suatu waktu terjadi di sebelah selatan China, ditandai adanya hari dengan turunnya suhu udara sampai 5° C dari suhu udara sebelumnya. Seringkali udara keluar tersebut bersamaan juga dengan formasi sistem tekanan tinggi di China. Perbedaan tekanan membawa penambahan kecepatan angin timur laut di Laut China Selatan dan bertiup menuju kawasan tropis yang hangat dan bertekanan rendah. Laut yang hangat dan angin yang lembab dan konvergen menyebarkan hujan di wilayah tropis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Melihat kondisi angin pada tanggal 30 Januari 2011 di ketinggian 2500 feet (gb.3) dan grafik suhu udara rata-rata bulan Januari 2011 (Gambar 4) dipastikan bahwa pada akhir bulan *cold surge* mencapai sekitar Batam.



Gambar 4. Vektor Angin 2500 ft, tanggal 30 Januari 2011 jam 12 utc (Sumber: JMA).



Gambar 5. Suhu Udara di Hang Nadim Batam-Januari 2011.

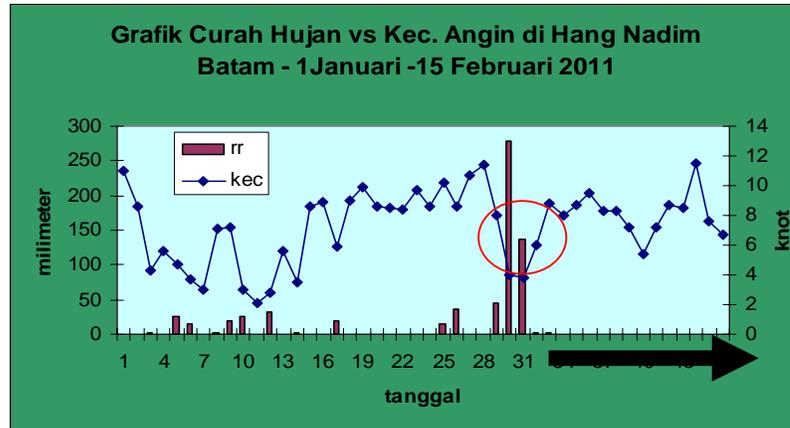
Distribusi Curah Hujan.

Terlihat pada Tabel.1 di Bareleng (Batam,Rempang,Galang), Bintan, dan Karimun terjadi hujan merata sejak tanggal 29 Januari 2011. Curah hujan harian maksimum terjadi pada tanggal 30 Januari 2011. Bahkan di Hang Nadim Batam hujan sehari pada tanggal 30 Januari 2011 melampaui normal hujan sebulan.

Tabel 1. Distribusi Curah Hujan Pada Tanggal 29-31 Januari 2011

no.	Nama Stasiun	tgl.29	tgl.30	tgl..31	total 3 hr (mm)	normal hujan bulanan
1	Jembatan-2	134.4	135.0	35.4	304.8	
2	Mukakuning					
3	Nongsa	47.2	298.0	70.8	416.0	
4	Pagoda					
5	Tj. Piayu					
6	Sei Harapan	36.4	103.2	44.5	184.1	
7	Sei Ladi					
8	Tj.Sengkuang					
9	Tj. Uncang					
10	Hang Nadim	45.0	279.5	137.2	461.7	269.5
11	T.Pinang-Bintan	48.3	234.7	92.7	375.7	295.9
12.	TB. Karimun					

Selanjutnya memperhatikan gambar-5 dan gambar-6, kejadian hujan selama bulan Januari 2011 pada umumnya ditandai oleh angin yang relatif lemah (<6 knot), dan suhu udara yang cenderung rendah dari hari sebelumnya.

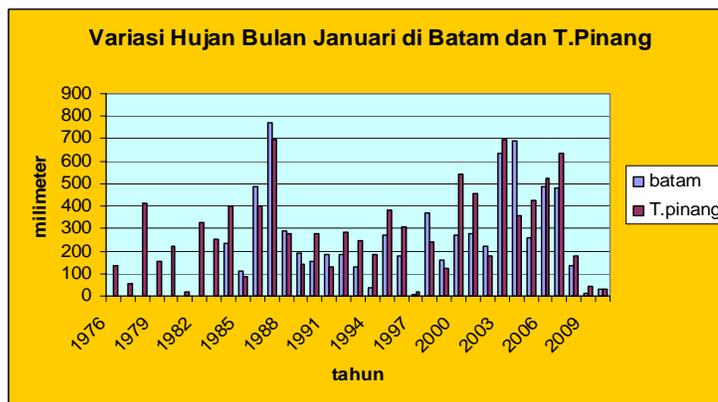


Gambar 6. Curah Hujan dan Kec.Angin Bulan Januari – 15 Februari 2011 di Hang Nadim Batam.

Variasi Hujan Bulan Januari di Kepri

Seperti terlihat pada grafik di bawah (Gb.7), bulan Januari bisa sangat basah dalam suatu tahun, namun juga bisa kering dalam tahun yang lain. Kondisi ini tergantung saat transisi dari Monsun timur laut ke akhir (atau phase kering) dari monsun.

Di Batam dalam periode 1984-2010 curah hujan tertinggi: 772 mm (th.1987) dan terendah: 9 mm (th.1997). Sedangkan di Tanjung Pinang curah hujan tertinggi dalam periode 1976-2010 adalah 698.3 mm terjadi tahun 1987 dan tahun 2003, sedangkan curah hujan terendah 17 mm (th.1997).

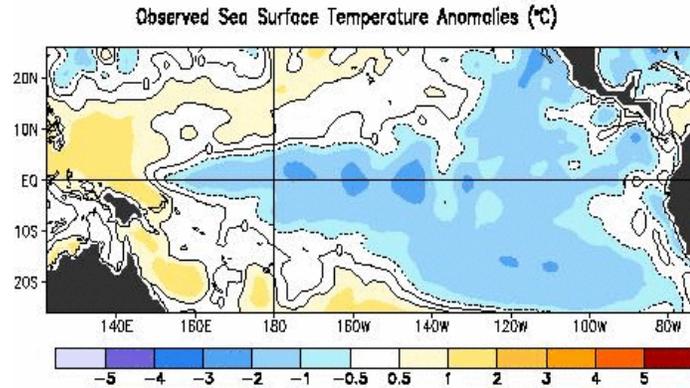


Gambar 7. Grafik Hujan Bulan Januari di Hang Nadim dan Tanjung Pinang

Kepulauan Kepri - Indonesia merupakan wilayah yang dilewati oleh garis katulistiwa serta dikelilingi oleh dua samudra dan dua benua. Posisi ini menjadikan Kepri sebagai daerah pertemuan sirkulasi meridional (Utara-Selatan) dikenal sebagai Sirkulasi Hadley dan sirkulasi zonal (Timur-Barat) dikenal sebagai Sirkulasi Walker, dua sirkulasi yang sangat mempengaruhi keragaman iklim di Kepri khususnya. Pergerakan matahari yang berpindah dari 23.5° Lintang Utara ke 23.5° Lintang Selatan sepanjang tahun mengakibatkan timbulnya aktivitas monsun yang juga ikut berperan dalam mempengaruhi keragaman iklim. Pengaruh lokal terhadap keragaman iklim juga tidak dapat diabaikan, karena Kepri merupakan kepulauan dengan bentuk topografi sangat beragam menyebabkan sistem golongan lokal cukup dominan. Faktor lain yang diperkirakan ikut berpengaruh terhadap keragaman iklim di Kepri ialah gangguan siklon tropis. Semua aktivitas dan sistem ini berlangsung secara bersamaan sepanjang tahun akan tetapi besar pengaruh dari masing-masing aktivitas atau sistem tersebut tidak sama dan dapat berubah dari tahun ke tahun (Boer, 2003).

Fenomena La-Nina yang sedang berlangsung saat ini juga merupakan salah satu akibat dari penyimpangan iklim. Fenomena ini akan menyebabkan peningkatan jumlah curah hujan untuk beberapa daerah di Indonesia. Pengaruh fenomena La-Nina terhadap hujan di

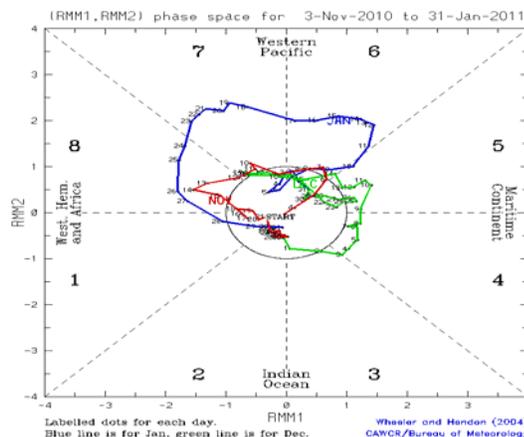
Indonesia sangat beragam. Pengaruh La Nina kuat pada daerah yang berpola hujan monsun, lemah pada daerah berpola hujan equatorial dan tidak jelas pada daerah dengan pola hujan lokal (Tjasyono, 1997 dalam Irianto, dkk., 2000), sedangkan IOD hanya berpengaruh jelas pada daerah berpola hujan monsun (Nugroho and Yatini, 2007).



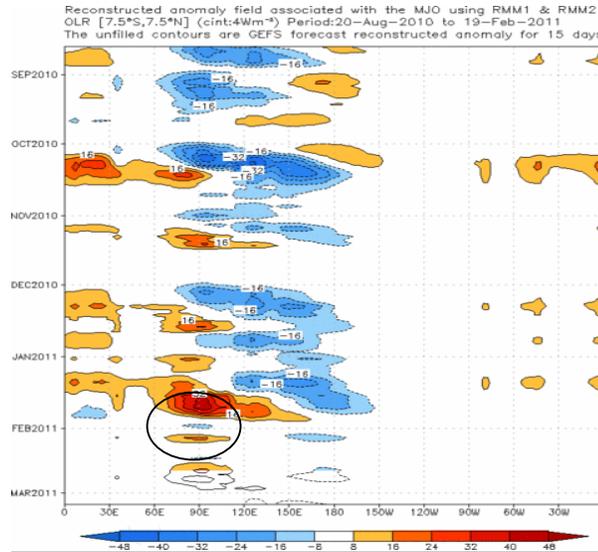
Gambar 8. Anomali SPL di Pasifik Tropis (Sumber: NOAA)

Selain akibat pengaruh fluktuasi suhu permukaan laut di samudera pasifik dan Samudera Hindia (ENSO dan IOD), fenomena fase aktif osilasi intra-musiman yg dikenal sebagai MJO (Madden-Julian Oscillation) juga mempengaruhi variabilitas hujan di Kepri. MJO adalah osilasi/gelombang tekanan (pola tekanan tinggi-tekanan rendah) dengan periode lebih kurang 48 hari yang menjalar dari barat ke timur. Biasanya berawal di pantai timur Afrika kemudian menjalar ke timur dan menghilang di bagian tengah Pasifik . Menurut Geerts and Wheeler (1998) MJO akan menyebabkan terjadinya variasi pada pola angin, suhu permukaan laut (SPL), awan dan hujan. Fase aktif MJO bila bersamaan waktunya dengan dengan musim hujan (Desember, Januari dan Februari) atau angin munsun timurlaut dapat menyebabkan terjadinya peningkatan curah hujan sekitar 200%.

Terkait dengan peristiwa cuaca tanggal 30-31 Januari 2011, posisi MJO saat itu berada antara fase 2 dan fase 3 (Gambar 9) dengan intensitas lemah ditandai oleh anomali OLR negatif yang kecil (warna biru pada gb.10). Meskipun lemah setidaknya terjadi perubahan IOD dari positif ke IOD negatif. Posisi MJO tersebut dan didukung pula punahnya bibit badai tropis di utara Australia membuat angin monsun timur laut di Laut China Selatan bagian selatan tidak mengalami pembelokan ke kiri, sehingga penetrasi langsung ke daratan semenanjung Malaka dan Sumatra. Oleh topografi terjadi penurunan kecepatan angin, timbullah konvergensi kuat di lapisan bawah. Masa udara di sekitar Kepri yang hangat dan kaya uap air terkait suhu permukaan laut yang tinggi karena even La Nina terangkat oleh udara yang dingin. Proses terakhir terbentuk kelompok awan Cumulonimbus yang menurunkan hujan lebat.



Gambar 9. Fase MJO.



Gambar 10. Anomali OLR.

KESIMPULAN

Dari data dan uraian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa aktivitas cuaca sekitar tanggal 29-31 Januari 2011 yang menimbulkan hujan lebat sehingga berdampak banjir di sekitar Kepri diakibatkan oleh :

1. Aktivitas seruaq dingin (cold surge) monsun timur laut.
2. Posisi MJO di samudra Hindia dan punahnya bibit badai tropis di utara Australia menjadikan angin timur laut penetrasi langsung ke semenanjung Malaka bagian selatan dan Sumatra.
3. *Blocking* topografi menimbulkan konvergensi kuat di lapisan bawah.

DAFTAR PUSTAKA

Geerts, B. and M.Wheeler., 1998 . *The Madden – Julian Oscillation*.

Wheeler M. 2002. *The Madden Julian Oscillation and the Java Floods of January/February 2002*. Bureau of Meteorology Research Centre, Australia.

Tsing-Chang C., H. Wan-Ru, and W.A. GALLUS, Jr. 2002. *An East Asian Cold Surge: Case Study*. Atmospheric Science Program, Department of Geological and Atmospheric Sciences, Iowa State University, Ames, Iowa.

Boer, R. 2003. *Penyimpangan Iklim Di Indonesia*. Makalah Seminar Nasional Ilmu Tanah. KMIT Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM, Yogyakarta.

Tjasyono, B. 2004. *Klimatologi*. IPB Press, Bogor.

Tangang, F.T. 2008. On the roles of the northeast cold surge, the Borneo vortex, the Madden-Julian Oscillation, and the Indian Ocean Dipole during the extreme 2006/2007 flood in southern Peninsular Malaysia. *Geophysical Research Letters* 35.

BIODATA PENULIS

Alberth Christian Nahas. Lahir di Banjarbaru, 5 Mei 1985. Menamatkan pendidikan S1 pada tahun 2007 dari Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lambung Mangkurat dengan gelar Sarjana Sains dari Jurusan Kimia. Saat ini menjabat sebagai staf Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.

Dian Mayangwulan. Lahir di Pati, 28 November 1983. Pendidikan terakhir AMG Jakarta Jurusan Meteorologi tahun 2006. Saat ini sedang melanjutkan studi S1 Jurusan Sains Atmosfer di Institut Teknologi Bandung. Sehari-hari bekerja sebagai staf di Stasiun Meteorologi Frans Kaisepo Biak.

Edison Kurniawan. Lahir di Jakarta tanggal 5 Maret 1971. Menamatkan pendidikan Diploma III BPLMG Badan Diklat Departemen Perhubungan Jurusan Meteorologi tahun 1994. Memperoleh gelar Sarjana Fisika dari Universitas Indonesia tahun 2000. Gelar Magister Sains bidang Sains Atmosfer diperoleh dari Institut Teknologi Bandung tahun 2008. Saat ini menjabat sebagai Kepala Sub Bidang Pencemaran Udara, Pusat Perubahan Iklim dan Kualitas Udara BMKG Jakarta.

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.

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.

Imam Prawoto. Lahir di Bora tanggal 27 Januari 1956. Menyelesaikan pendidikan Diploma I Meteorologi pada tahun 1978, kemudian dilanjutkan dengan Diploma III pada bidang yang sama dan tamat pada tahun 1985. Tahun 1994, beliau memperoleh gelar Sarjana Sains di bidang Fisika dari Universitas Indonesia. Saat ini menjabat sebagai Kepala Seksi Observasi Stasiun Meteorologi Klas I Hang Nadim Batam.