

KARAKTERISTIK CO₂ PERMUKAAN DI BANDUNG TAHUN 2008-2009 (PENGUKURAN TETAP DI WILAYAH PASTEUR)

Chunaeni Latief, Asif Awaludin, dan Afif Budiyo
Peneliti Bidang Jizon Polud PUSFATSATKLIM, LAPAN
e-mail: chunaeni@yahoo.com.

ABSTRACT

A fixed instrument for CO₂ measurement (LPN SATKLIM-1B) has been built and installed at LAPAN Bandung, started by using a direct recorder system on the computer then it is completed with data connection to the CO₂ monitoring web server. The CO₂ sensor used by NDIR technology has been corrected by the temperature and pressure compensation. The sensor was installed on 15 m above ground level, acquired and also recorded its data by monitoring the software developed by using the Microsoft Visual Basic 6.0. From the recording result of measurement data in Bandung from 2008 until 2009, with one minute interval data, it was obtained that the data characteristic compared to the measurement data from Global Atmospheric Watch (GAW) station in Kototabang (using spectroscopy technology) and Mauna Loa, all of them have the same pattern. From one year analysis (2008 – 2009) it was also obtained that by the increase of motor vehicle in Bndung for about 226,500 vehicle a year, 76% land building, and just 8.7% green open spaces, the CO₂ has increased 1.5 ppm and the temperature from AWS data 2008-2009 (a year) data has increased 4.3°C. In another side, the CO₂ multiplication effect has occurred at 06.30-08.00 AM according to surface and vertical profile measurements, due to stable atmosphere and calm wind.

Key words: *Surface fixed system, CO₂ concentration, Convection*

ABSTRAK

Telah dibuat instrumen pengukur CO₂ tetap (LPN SATKLIM -1B) dan dipasang di LAPAN Bandung, yang dimulai dengan sistem perekam langsung pada komputer yang selanjutnya dilengkapi dengan koneksi data ke web server pemantau CO₂. Sensor CO₂ yang dipakai instrument tersebut menggunakan teknologi NDIR dan telah dikoreksi dengan kompensasi suhu dan tekanan udara. Sensor tersebut dipasang pada ketinggian 15 m dari permukaan tanah dan diakuisisi serta perekaman

datanya menggunakan software pemantau yang dibuat dengan menggunakan Microsoft Visual Basic 6.0. Hasil perekaman data pengukuran CO₂ di Bandung dari tahun 2008 sampai 2009 dengan interval waktu satu menit, didapatkan hasil karakterisasi data tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran dari stasiun *Global Atmospheric Watch* (GAW) di Kototabang (prinsip spektroskopi) dan Mauna Loa, semuanya mempunyai pola yang sama. Dari analisis selama satu tahun (2008-2009) juga didapatkan bahwa dengan peningkatan kendaraan bermotor di Bandung sebanyak 226.500 kendaraan pertahun, lahan terbangun 76%, ruang terbuka hijau 8,7%, telah terjadi peningkatan CO₂ 1,5 ppm dan temperatur dari data AWS satu tahun 2008-2009, terjadi peningkatan 4,3°C. Di sisi lain, terjadi peningkatan konsentrasi CO₂ antara pukul 6.30 - 800 baik dari hasil pengukuran level permukaan maupun pengukuran profil vertikal, karena atmosfer masih stabil dan angin tenang.

Kata kunci: *Sistem pengukur tetap di permukaan, Konsentrasi CO₂, Konveksi*

1 PENDAHULUAN

Hasil penelitian konsentrasi CO₂ di berbagai tempat dari tahun ke tahun menunjukkan peningkatan. Tahun 2008 konsentrasi CO₂ di dunia 380 ppm (Tom V. Segalstad, 2008). Padahal saat awal revolusi industri tahun 1750 konsentrasi CO₂ hanya 278 ppm. Sementara ini, sebagian peneliti dengan IPCC sebagai motor beranggapan bahwa faktor dominan perubahan iklim disebabkan meningkatnya konsentrasi CO₂ khususnya di permukaan yang akan menyerap radiasi infra merah dari emisi panas Bumi setelah menerima panas Matahari, sehingga panas permukaan Bumi meningkat.

Tujuan penulisan ini adalah memaparkan hasil pemantauan CO₂ permukaan selama satu tahun di Bandung, dengan sasaran menganalisis karakteristik CO₂ permukaan dan kaitannya dengan perubahan temperatur.

Metodologi yang digunakan adalah: membandingkan hasil pemantauan CO₂ permukaan di Bandung dengan kenaikan temperatur, serta melihat hasil perekaman di Mauna Loa Hawaii. Basis data monitoring dari pengukuran menggunakan peralatan SATKLIM LPN-1B yang dikembangkan sendiri di Lab Instrumentasi Polusi Udara Jizon Polud PUSFATSATKLIM-LAPAN. Instrumen ini digunakan untuk memantau CO₂ permukaan yang telah digunakan sejak 2008 dan dipasang di lantai IV Gedung III PUSFAT SATKLIM LAPAN Bandung

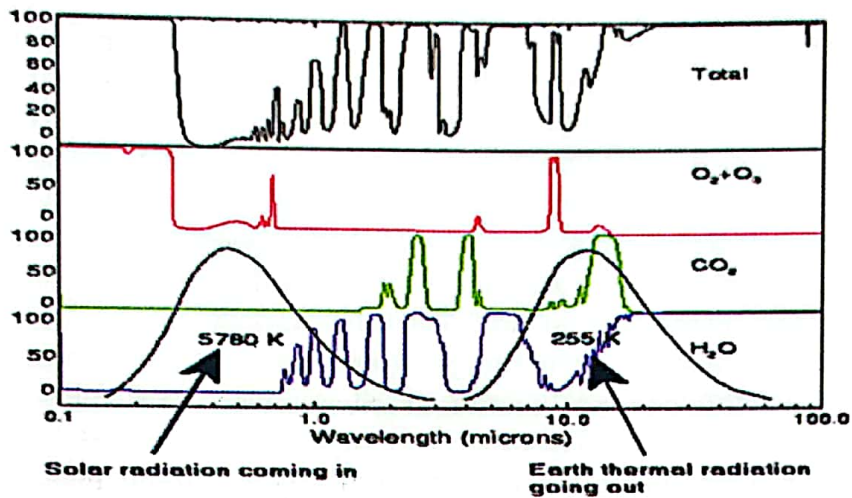
dengan ketinggian 15 m dari permukaan tanah. Pembuatan software memakai bahasa Microsoft Visual Basic 6.0 untuk memproses sinyal yang ke komputer dan merekam data. Hasilnya dilakukan perbandingan pola hasil pemantauan di Bandung (prinsip NDIR - non dispersive infrared) dengan tempat lain (Kototabang) yang menggunakan metode spektroskopi dan pola hasil dari Mauna Loa.

Hasil keseluruhan pemantauan dilakukan analisis perubahan rata-rata bulanan yang dituangkan dalam empat musim di Bandung (kemarau, peralihan, hujan dan peralihan). Untuk melihat terjadinya perubahan harian dilakukan perekaman pada pengukuran pola vertikal melalui wahana balon pada pagi hari sebanyak tiga kali, dengan waktu yang berbeda, namun pola di bawah mirip. Dalam penyajian ini diperlihatkan satu kali peluncuran, sebagai pembanding terjadinya peningkatan level konsentrasi pada pagi hari, dimana atmosfer masih stabil dan sinar Matahari baru muncul. Trend terjadi kenaikan konsentrasi di daerah permukaan dan dibandingkan dengan temperatur rata-rata selama pengamatan di lokasi yang sama.

2 LANDASAN TEORI

Temperatur rata-rata udara permukaan Bumi sedikit lebih dingin dibandingkan dengan temperatur permukaan Bumi. Inilah alasan bahwa atmosfer dengan Gas Rumah Kaca (GRK) mempunyai peranan yang sangat besar pada emisi radiasi inframerah ke ruang angkasa. Efek GRK ini, sementara diduga penyebab permukaan Bumi semakin panas (Heinz Hüge, diakses 31 Juli 2008).

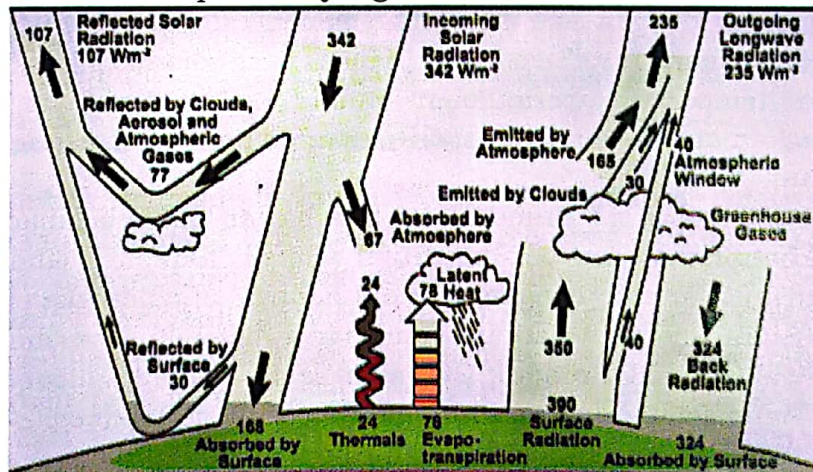
Sinar Matahari yang datang ke permukaan Bumi (dari 0,2 - 2 μm), didominasi oleh daerah panjang gelombang visible (lihat Gambar 2-1 bawah paling kiri). Sinar Matahari ini akan menyebabkan permukaan Bumi panas dan mengemisikan radiasi infra merah dari panjang gelombang inframerah dekat sampai inframerah jauh terutama daerah C yaitu 2-30 μm (Gambar 2-1 paling bawah sebelah kanan). Panas permukaan Bumi dengan dominan gelombang inframerah daerah C ini diserap oleh gas rumah kaca termasuk uap air dan partikulat yang ada di atmosfer.



Gambar 2-1:Radiasi Matahari yang jatuh ke Bumi daerah UV, visible dan inframerah dekat, (paling bawah kiri). Radiasi dari permukaan Bumi dominan pada inframerah menengah (paling bawah sebelah kanan. (Thomas Everth's Green, akses 2008)

Dari Gambar 2-1 diperlihatkan bahwa radiasi infra merah permukaan Bumi antara 2-30 μm ini diantaranya diserap CO₂ pada berbagai puncak serapan. Oleh karena itu pada pendeteksian CO₂ menggunakan prinsip puncak absorpsi inframerah oleh CO₂ pada cuatan-cuatan absorpsi utama di daerah C.

Sensor CO₂ yang digunakan dan banyak dikembangkan adalah sistem *Non Dispersive Infra Red* (NDIR) ini dirancang dengan memfilter daerah radiasi C untuk meloloskan puncak panjang gelombang tersebut sebagai indikasi serapan CO₂ yang dideteksi.



Gambar 2-2:Proses radiasi panas Matahari dan panas permukaan Bumi yang ke atmosfer dan kembali ke permukaan Bumi (sumber: www.colorado-earthfriends.org/science.htm)

Bumi setiap tahun dalam kondisi keseimbangan energi (lihat Gambar 2-2), radiasi sinar Matahari yang datang ke Bumi sebesar 342 Wm^{-2} , 49% (168 Wm^{-2}) diabsorpsi permukaan Bumi, (77 Wm^{-2}) dipantulkan oleh awan atas dan kembali ke ruang angkasa dan sebesar (67 Wm^{-2}) diserap atmosfer. Sebagian kecil radiasi Matahari ini (30 Wm^{-2}) oleh Bumi dipantulkan kembali ke atmosfer yang bersatu dengan 77 Wm^{-2} pantulan dari awan yang di atas menjadi 107 Wm^{-2} kembali melesat dan hilang ke luar angkasa. Oleh karena itu daerah atmosfer lebih dingin dibandingkan dengan permukaan Bumi hal ini karena penyerapan radiasi infra merah di bawah oleh GRK di permukaan maupun awan di bagian bawah.

Panas Bumi ini memancarkan kalor dengan gelombang inframerah daerah C ($2\text{-}30 \mu\text{m}$) dan gelombang panjang lainnya. Kalor ini menuju ke atmosfer sebesar 390 Wm^{-2} terdiri dari 40 Wm^{-2} ke luar angkasa yang lolos melewati jendela atmosfer dan 350 Wm^{-2} ke atmosfer yang menyatu dengan panas permukaan sebesar 24 Wm^{-2} (panas sensible) dan tambahan panas evapotranspirasi sebesar 78 Wm^{-2} (panas laten). Dengan demikian panas total yang berada di atmosfer adalah ($67 + 24 + 78 + 350 \text{ Wm}^{-2} = 519 \text{ Wm}^{-2}$). Panas sebesar 519 Wm^{-2} diemisikan ke luar angkasa sebesar 165 Wm^{-2} dan dari panas laten awan atas yang melesat ke ruang angkasa sebesar 30 Wm^{-2} , sehingga panas yang berada di atmosfer adalah 324 Wm^{-2} karena GRK dan uap air diradiasikan kembali ke Bumi (proses bolak balik) dan diserap permukaan Bumi kembali. Dengan demikian panas yang diserap permukaan Bumi total adalah $168 + 324 \text{ Wm}^{-2} = 492 \text{ Wm}^{-2}$ (lihat Gambar 2-2). Inilah kondisi keseimbangan energi, namun secara teoritik andaikata energi panas yang dipantulkan kembali ke Bumi semakin besar dengan asumsi akibat meningkatnya konsentrasi CO_2 , maka permukaan Bumi semakin panas yang dindikasikan dengan kenaikan temperatur permukaan Bumi. Kedua hasil ini dicoba dibandingkan antara konsentrasi CO_2 dan temperatur rata-rata selama satu tahun.

Secara geografis Bumi dibagi tiga bagian yaitu belahan utara, daerah khatulistiwa dan belahan Bumi selatan. Karena belahan utara lebih banyak daratan dengan tetumbuhannya dibandingkan dengan belahan Bumi selatan walaupun sama-sama memiliki 4 musim (hanya berbeda waktu), maka produk CO_2 akan lebih menonjol dibandingkan belahan Bumi selatan walaupun tergantung musim (Wikipedia, diakses Januari 2008). Kenyataannya belahan Bumi utara lebih banyak daratan dengan tetumbuhan, sehingga saat musim kemarau (gugur) dan musim semi sangat jauh berbeda, akibatnya osilasi konsentrasi CO_2 sangat jelas perbedaannya. Peningkatan konsentrasi CO_2 akan terjadi konveksi

ke atas dan menjalar sampai ke lapisan peralihan troposfer dan stratosfer akibat dinamika atmosfer. Hal ini yang dapat dikaji dinamika peralihan lapisan ini (Run-Lee Shia, et.al, 2006). Sebaliknya belahan Bumi selatan lebih banyak laut yang sementara dianggap sebagai rosotan dan karena daratan sedikit, maka perbedaan konsentrasi CO₂ antara musim kemarau (gugur) dengan musim semi tidak begitu besar dibandingkan dengan belahan Bumi utara atau osilasi perubahan maksimum dan minimum tidak begitu besar.

Bagaimana dengan daerah khatulistiwa? Karena daerah khatulistiwa antara musim hujan dan musim kemarau maupun peralihan tidak begitu mencolok dan tumbuh-tumbuhan hampir sama, maka osilasi antara kemarau dan hujan hampir sama. Kajian yang dilakukan ini merupakan hasil pengukuran di Bandung (dekat khatulistiwa) pada koordinat 06.53.6967 LS, 107.35.1956 BT.

3 PENGUKURAN DAN DATA

Untuk mengamati karakteristik CO₂ dikembangkanlah instrumen pemantau CO₂ vertikal SATKLIM LPN-1A dan horizontal (permukaan) SATKLIM LPN-1B (Chunaeni Latief, dkk, 2008). Karakterisasi CO₂ vertikal dilakukan dengan wahana balon sedangkan pengukuran di permukaan digunakan pemantauan tetap salah satunya di daerah urban Bandung. Pada pemaparan ini diketengahkan hasil pengukuran di Bandung selama satu tahun yaitu 2008-2009. Demikian juga pengukuran temperatur di tempat yang sama yang selama ini diduga sebagai indikasi terjadinya perubahan iklim khususnya temperatur.

Pemantauan diprogram untuk menampilkan nilai konsentrasi minimum, maksimum dan rata-rata serta tampilan saat pengukuran (lihat Gambar 3-3), dan membandingkan hasil pengukuran CO₂ vertikal dengan menggunakan wahana balon pada tempat yang sama.

3.1 Pembuatan Instrumen pemantau CO₂

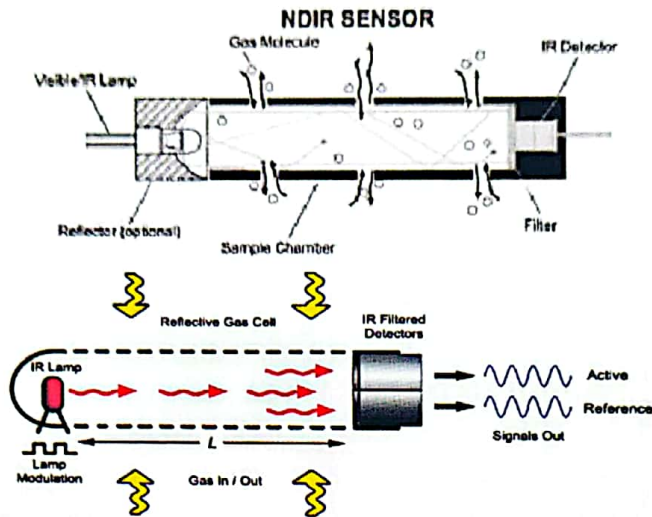
Untuk memantau kondisi CO₂ di Bandung khususnya di permukaan dirancang dan dibuat instrumen yang berbasis sensor VAISALA dan mikrokontroler sebagai pemroses data. Sensor yang digunakan sistem NDIR pada sumber infra merah daerah C yaitu 2 - 16 μm yang difilter menggunakan *Blocked Filter* pada infra merah 4,7 μm , yang dipilih satu puncak terkuat yang diserap oleh molekul CO₂. Setiap sensor CO₂ VAISALA ini telah mendapat sertifikat kalibrasi dari The Netherland Measurement Institute (NMI) (lihat Gambar 3-1).

Udara bebas yang mengandung CO₂ masuk ke lubang-lubang ruang sensor pengukuran yang dipasang filter debu. Dengan prinsip Beer Lambert dideteksi konsentrasi CO₂:

$$I_s = I_o (1 - e^{-adc}) \quad (3-1)$$

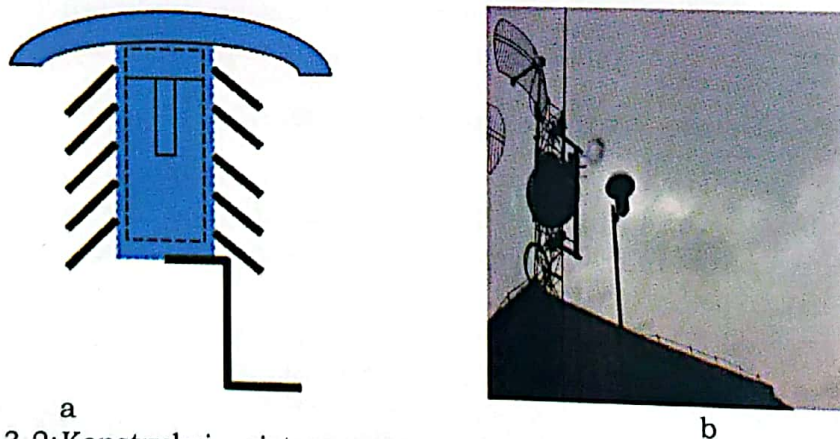
I_s , I_o intensitas cahaya yang diterima sensor dan intensitas cahaya semula W/m^2 , a koefisien serapan CO_2 terhadap inframerah, c konsentrasi CO_2 (ppm), d jarak lintasan cahaya infra merah (m).

Keluaran detektor infra merah yang diproses oleh modul microdriver diumpankan ke komputer untuk diproses lebih lanjut (lihat Gambar 3-3).



Gambar 3-1: Sensor NDIR dan spektrum serapan CO_2 di atmosfer

Peralatan pemantau CO_2 ini dikembangkan sendiri berbasis sensor VAISALA dan mikrokontroler sebagai pemroses sinyal keluaran sensor dengan perangkat lunak yang digunakan untuk memproses data di komputer dipasang sejak bulan Mei 2008 (lihat Gambar 3-2).



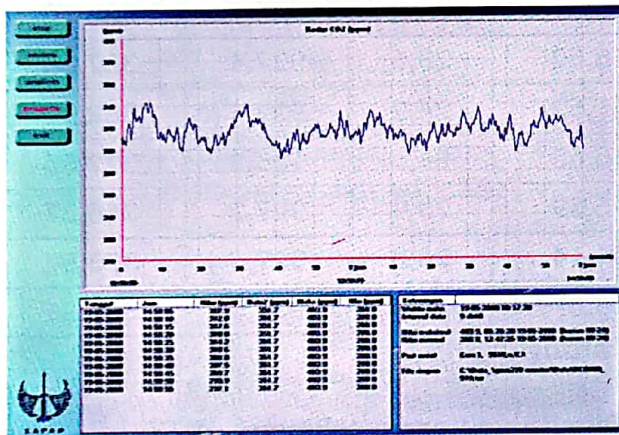
Gambar 3-2: Konstruksi sistem sensor dan peletakkannya, a. sensor dalam rumah pelindung sinar Matahari dan hujan, b. peletakan sensor pada ketinggian 15 m dari permukaan tanah

Peletakan sensor ini, dengan anggapan bahwa pengaruh radiasi infra merah yang berasal dari Bumi akan diserap oleh GRK salah satunya CO₂ mengalami peluruhan mencapai titik terendah sampai jarak 300 m dari permukaan tanah (hanya terjadi di atmosfer bawah, Vincent Gray, 2008).

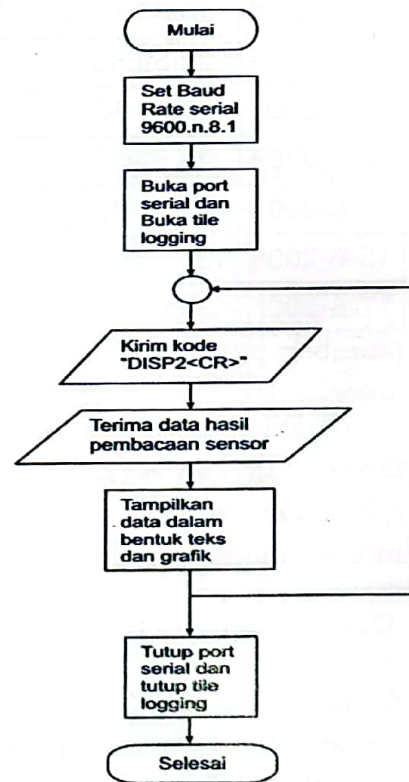
3.2 Perangkat Lunak

Monitoring dan pemrosesan pada komputer mempunyai 4 fungsi yaitu: akuisisi data sensor, visualisasi data (grafik dan teks), penyimpanan data (file.txt) dan analisis data (waktu perekaman hari, pukul, menit dan detik, maksimum, minimum, rerata serta data sesaat dan selama 24 jam). Perangkat lunak ini dikembangkan dengan bahasa Microsoft Visual Basic 6.0, lihat Gambar 3-3a.

Pemantauan dilakukan setiap hari terus menerus dan data dicuplik setiap 1 menit sekali. Grafik dan data direkam dan ditampilkan setiap saat (lihat Gambar 3-3a) setelah melalui program koreksi (persamaan 3-2) yang disatukan dengan software (lihat Tabel 3-1), yang tergantung fluktuasi temperatur dan tekanan.



(a)



(b)

Gambar 3-3: Tampilan data: a. grafik dan data digital dalam bentuk tampilan tanggal, waktu, nilai saat itu, nilai rerata, minimum dan maksimum, b. program untuk menampilkan di komputer

Tabel 3-1: SALAH SATU HASIL PENGUKURAN KONSENTRASI CO₂ PERMUKAAN DI BANDUNG DENGAN KONSENTRASI HASIL KOREKSI (PADA JAM YANG SAMA SETIAP HARINYA)

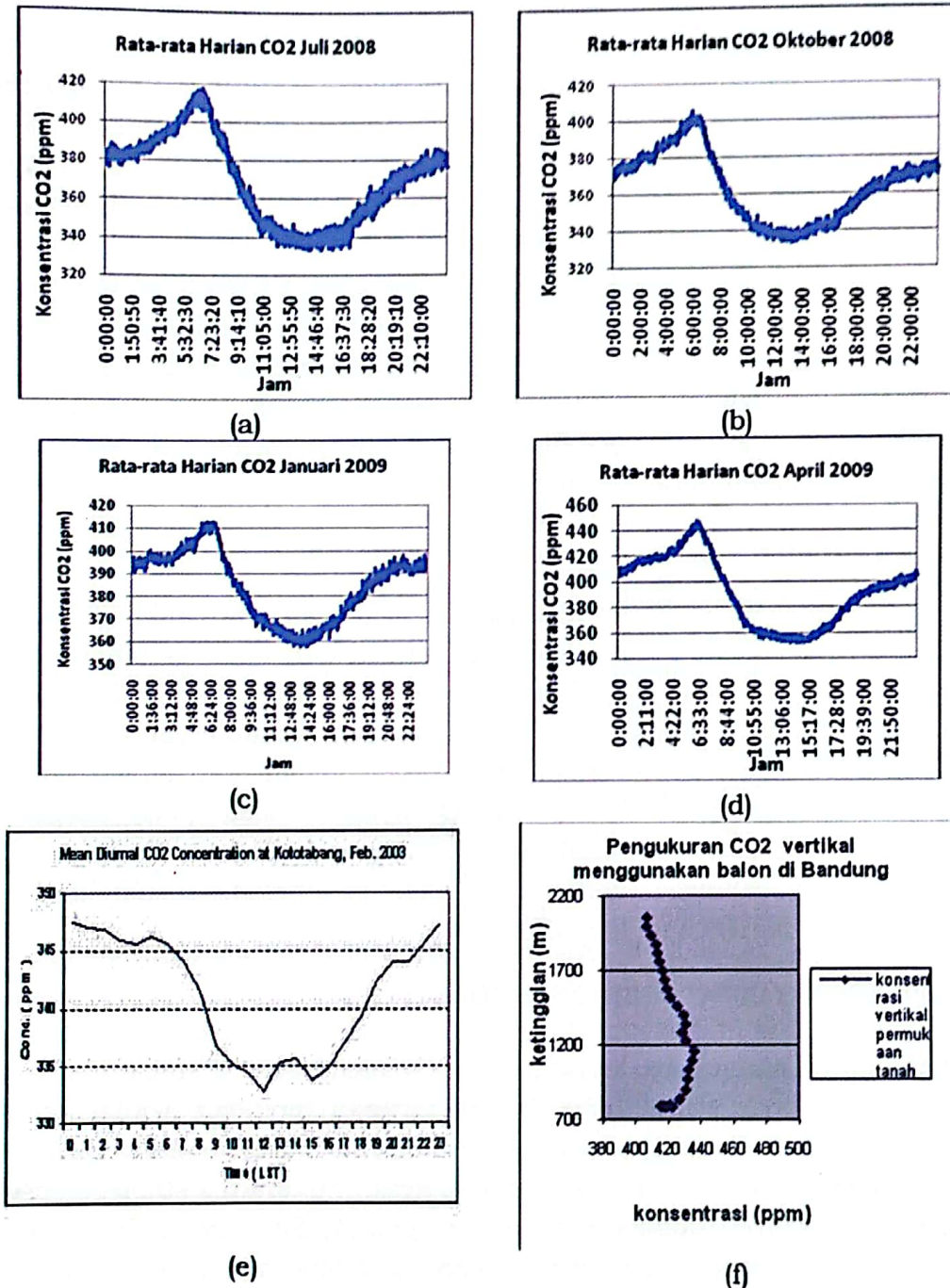
Tanggal	Pukul	Konsentrasi terukur CO ₂ (ppm)	Temp °C	Tekanan (hPa)	Konsentrasi hasil koreksi CO ₂ (ppm)
01-6-2008	23:59:55	349,38	23,8	927,3	380,13
02-6-2008	23:59:55	346,49	23,1	926,4	376,46
03-6-2008	23:59:55	336,98	23,4	927,4	366,11
04-6-2008	23:59:55	341,90	23,2	927,5	371,41
05-6-2008	23:59:55	341,83	23,6	926,3	371,69
06-6-2008	23:59:55	338,19	23,8	926,5	368,27
07-6-2008	23:59:55	334,52	24,1	925,8	364,92
08-6-2008	23:59:55	341,72	23,5	925,3	372,25
09-6-2008	23:59:55	351,39	24,0	927,3	382,58
10-6-2008	23:59:55	356,39	23,8	926,7	388,10
11-6-2008	23:59:55	356,60	23,6	927,4	387,68
12-6-2008	23:59:55	351,62	24,2	927,4	382,93
13-6-2008	23:59:55	346,63	24,0	926,9	377,56
14-6-2008	23:59:55	345,39	23,9	927,2	366,37
15-6-2008	23:59:55	344,14	23,5	927,5	373,97
17-6-2008	23:59:55	336,67	23,4	927,3	365,81

(sumber: pengukuran dan perhitungan)

Dikarenakan sensor dikalibrasi pada tekanan 1013 hPa dan temperatur 298°K (25°C), maka pada saat pengukuran di suatu tempat dilakukan koreksi data terhadap tekanan dan temperatur dengan menggunakan persamaan gas ideal yang sudah disesuaikan yaitu:

$$C_{koreksi} = C_{ukur} \{1013 \times (T+273)\} / (298 \times P) \quad (3-2)$$

Dimana C_{koreksi} konsentrasi CO₂ yang sudah dikoreksi (ppm), C_{ukur} konsentrasi CO₂ hasil pengukuran (ppm), P tekanan saat pengukuran (hPa) dan T temperatur pengukuran saat itu (°C).



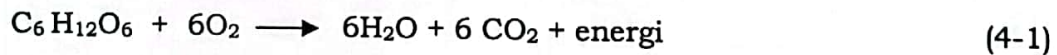
Gambar 3-4: Grafik konsentrasi CO₂ setiap musim selama satu tahun a. Juli, musim kemarau, b. Oktober musim peralihan kemarau ke hujan, c. Januari musim hujan, d. April peralihan dari hujan ke kemarau (hasil analisis), e. Kototabang 2003 prinsip spektroskopi (GAW Kototabang), f. hasil pengukuran CO₂ vertikal di Bandung dengan wahana balon tahun 2008 sebanyak 3 kali, (contoh: hasil pengukuran dan analisis, Chunaeni Latief, dkk, 2008)

Analisis data dengan melihat empat musim (lihat Gambar 3-4), serta data pengelompokan selama satu tahun. Untuk melihat kondisi kecenderungan data dilakukan perbandingan dengan grafik yang diambil secara sampling standar oleh GAW di Kototabang (diukur dengan sistem spektroskopi), dan dibandingkan juga dengan hasil perekaman dunia Mauna Loa.

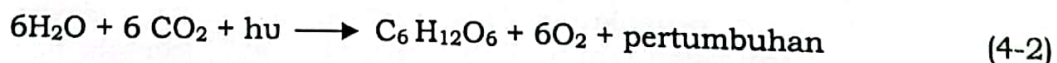
Untuk mengamati adanya peningkatan konsentrasi CO₂ saat Matahari mulai terbit, dilakukan perbandingan perekaman Vertikal menggunakan wahana balon dengan instrument LPN-SATKLIM- 1A. Selanjutnya diamati konsentrasi permukaan sampai batas konsentrasi naik dan turun, sehingga diperoleh gambaran perekaman pagi hari pada saat terjadi puncak konsentrasi.

4 ANALISIS

Pemasangan sensor dilakukan dengan sistem terbalik, dilindungi dengan filter debu 1 mikron dan dilindungi dari sinar Matahari serta hujan dengan sistem sirip (lihat Gambar 3-2a). Dari Gambar 3-4 dapat dilihat pola hasil pengukuran CO₂ di Bandung setiap bulan dari bulan Juni 2008 – Mei 2009 hampir sama. Saat malam hari terjadi proses respirasi dengan pembakaran C₆H₁₂O₆ dengan 6 molekul O₂ melepas 6 molekul CO₂ dan 6 molekul air. Ditopang juga kondisi udara malam hari stabil sehingga konsentrasi CO₂ meningkat, sesuai dengan persamaan respirasi (4-1) adalah:



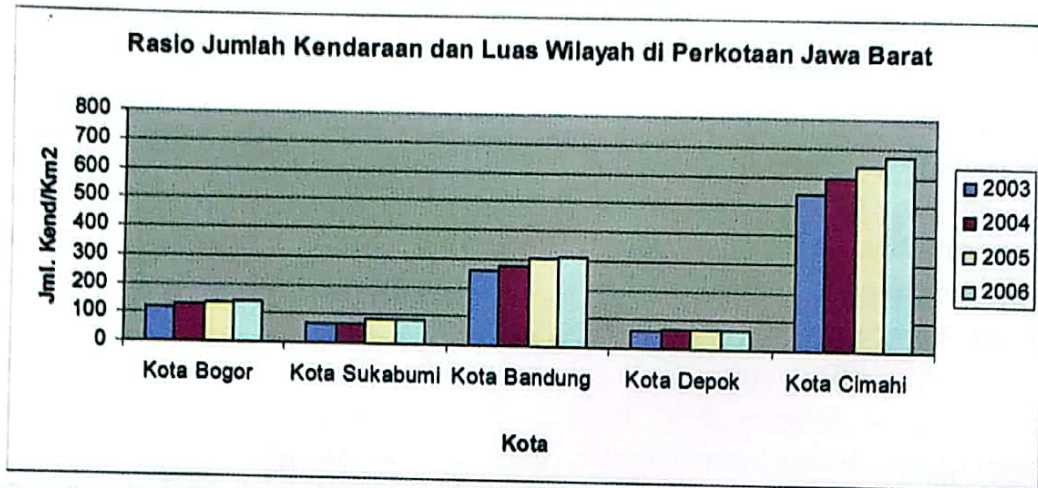
Sebaliknya siang hari konsentrasi CO₂ menurun (Gambar 3-4 a-e) dimulai sekitar pukul 6.30 dan penurunan terendah sekitar pukul 13.00 - 14.00. Tentunya ini ditopang dari reaksi fotosintesa persamaan 4-2 yang banyak melepas oksigen dan kondisi udara tak stabil sehingga terjadi dispersi konsentrasi. Pada proses fotosintesa ini terjadi pemekaran tetumbuhan yang akan menyimpan unsur karbon di batang, akar dan dedaunan. Oleh karena itu hutan dengan tetumbuhan yang masih muda efektif sebagai sink CO₂, dan akan banyak menyimpan karbon. Reaksi persamaan (4-2) akan menunjukkan pada siang hari fotosintesa membutuhkan CO₂:



Dari kedua reaksi (4-1 dan 4-2), maka antara malam hari 6 molekul O₂ dibutuhkan untuk respirasi dengan pelepasan 6 CO₂. Di siang haripun memerlukan 6 molekul CO₂ melepas 6 molekul O₂. Sepintas seimbang, namun saat siang hari terjadi penyimpanan karbon di semua tetumbuhan yang berbentuk C₆ H₁₂O₆ yang diikuti penambahan besarnya pohon dan akar serta lebatnya dedaunan. Bagaimanapun, semakin besar tumbuh-tumbuhan dengan banyak daun dapat menarik CO₂ lebih banyak.

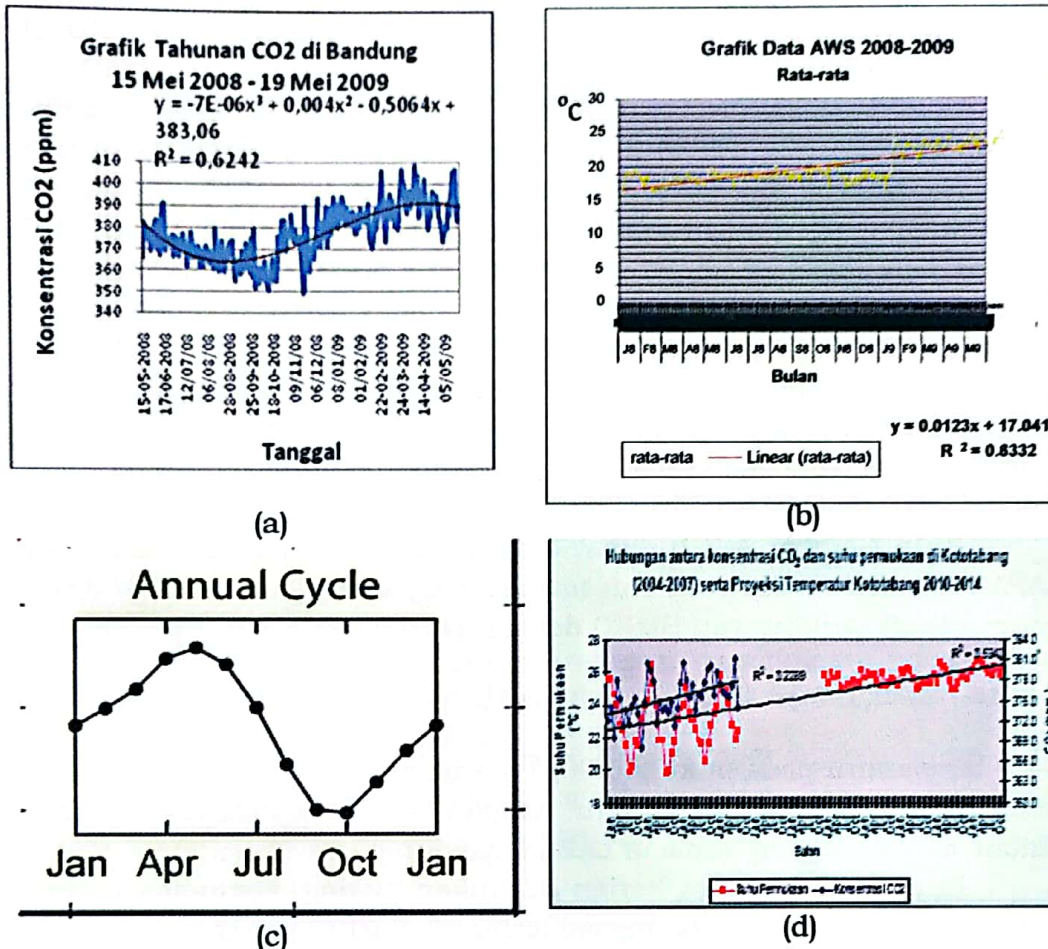
Jika dilihat puncak konsentrasi CO₂ di atmosfer bawah terdapat pada pukul 6.00 - 7.30 terjadi saat Matahari mulai memanaskan permukaan Bumi (lihat Gambar 3-4:a-d). Karena gas CO₂ agak berat, saat malam hari masih berada di permukaan bawah akibat respirasi dan atmosfer relatif stabil serta angin tenang. Begitu Matahari memanaskan permukaan Bumi, konveksi masih lemah karena atmosfer mendekati stabil sampai netral. Akibatnya konsentrasi CO₂ meningkat, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4-1d menunjukkan pola vertikal dengan konsentrasi tinggi di permukaan kemudian turun mencapai ketinggian 1850 m. Dengan demikian konveksi lemah dan belum terjadi dispersi kuat pada pagi hari, dan berakhir pada proses fotosintesa yang menyerap CO₂, siklus ini terjadi setiap hari dan mirip.

Osilasi konsentrasi CO₂ di wilayah khatulistiwa tidak begitu mencolok, karena mengenal dua musim kemarau dan hujan sedangkan saat kemarau tumbuh-tumbuhan (hutan dsb) masih tetap hijau dan sedikit perubahannya pada musim hujan. Perbedaan konsentrasi antara pelepasan dan rosotan akan tidak begitu menonjol. Bila dilihat pola satu tahun, maka puncak CO₂ di Bandung terjadi bulan Maret - April yaitu musim peralihan dikarenakan saat musim hujan tumbuh-tumbuhan sedang berkembang dengan arah angin dari barat pada latar belakang perkotaan dan musim peralihan (masih ada hujan) tumbuh-tumbuhan puncak pertumbuhan dengan dedaunan yang lebat. Sedangkan terendah pada bulan Agustus-September yaitu musim kemarau dimana sebagian tetumbuhan banyak yang kering sehingga produksi atau sink CO₂ kurang. Jika dilihat di Mauna Loa puncak tertinggi pada bulan April-Mei tatkala musim semi, sehingga produksi CO₂ paling tinggi, sedangkan terendah saat musim gugur yang jatuh pada bulan September-Oktober. Dibandingkan dengan osilasi tahunan dari Mauna Loa akan satu tipe hanya konsentrasinya yang berbeda (lihat Gambar 4-2a dan 4-2c).



Gambar 4-1: Ratio kendaraan bermotor per luas wilayah di Jawa Barat (Sumber BPLHD Jabar, 2008)

Hasil pengamatan selama satu tahun terlihat bahwa konsentrasi CO₂ rata-rata cenderung meningkat, awalnya konsentrasi di bulan Mei 2008 sebesar 381,3 ppm, dan pada bulan Mei 2009 menjadi 383,0 ppm, sehingga telah terjadi kenaikan 1,5 ppm. Kenaikan konsentrasi CO₂ juga dipicu oleh peningkatan kendaraan bermotor tahun 2008 ke 2009 sebanyak 7-10% dengan jumlah kendaraan bermotor di Kota Bandung pada tahun 2009 dari data Samsat Kota Bandung mencapai 1,2 juta (Tempo Interaktif Nasional, 2009), dengan kepadatan kendaraan bermotor sudah mencapai 7.146,66 /km². Padahal kepadatan kendaraan bermotor tahun 2006 di Bandung hanya 309,62/ km² (Setiawan Wangsaatmaja, 2008), atau sekitar 520.000 kendaraan (lihat Gambar 4-1). artinya dalam kurun waktu 3 tahun Kota Bandung mengalami lonjakan kendaraan sebanyak 680.000 kendaraan bermotor atau setiap tahun bertambah 226.500 kendaraan bermotor yang cukup signifikan dapat menyumbangkan peningkatan konsentrasi CO₂.



Gambar 4-2: a. Hasil rata-rata CO₂ setiap waktu selama satu tahun dan diplot (sumber: Hasil pengukuran dan analisis) b. grafik temperatur pada tempat yang sama, selama satu tahun (hasil analisis), c. hasil perekaman satu tahun dari GAW Mauna Loa. (sumber: Manua Loa, Wikimedia Commons, 2008), d. hubungan konsentrasi CO₂ dengan suhu temperatur permukaan di Kototabang (Trismidiyanto dan Sartono. M, 2008)

Sejalan dengan hasil pengukuran tetap, pada pagi hari, demikian juga pada Gambar 3-4f, menunjukkan saat peluncuran balon untuk mengukur CO₂ waktu pagi hari (pukul 7.30) pada level permukaan konsentrasi CO₂ permukaan agak tinggi (412,3 ppm). Konsentrasi ini kemudian meningkat sampai ketinggian 1100 m dengan konsentrasi 450,5 ppm, selanjutnya turun sampai ketinggian 1800 m konsentrasi sebesar 400,5 ppm. Fenomena ini terjadi mulai adanya pemanasan permukaan Bumi (namun Matahari masih terhalang bukit di sekitar Bandung) dan atmosfer masih stabil dengan angin yang tenang, menyebabkan massa CO₂ di permukaan tinggi karena belum terjadi

dispersi akibat angin. Sebagai bukti dapat diamati dengan CO₂ vertikal dengan laju balon yang tenang ke atas.

Hasil perekaman LPN-SATKLIM-1B dimana kendaraan bermotor di jalan Pasteur pukul 6.30–8.00 sangat meningkat, konsentrasi masih tinggi. Hal ini telah dijelaskan di atas kondisi ini dikarenakan atmosfer masih stabil dengan angin relatif tenang pada kecepatan antara 0 – 1,0 m/detik dan konveksi sangat rendah (lihat Gambar 4-2 dan data pada Tabel 3-1). Selanjutnya pukul 8.00 ke atas konsentrasi CO₂ mulai menurun. Puncak penurunan sekitar pukul 13.00-14.00. Dengan demikian proses fotosintesa berjalan efektif yang membutuhkan CO₂ disertai dengan kondisi udara yang tidak stabil, dan angin sudah mulai bertiup relatif kencang, sehingga membantu terjadinya dispersi CO₂, sehingga konsentrasi menurun.

Pada Gambar 4-2 b dapat dilihat hasil rekaman temperatur di LAPAN Bandung pada saat dan tempat yang sama (tahun 2008/2009) dengan basis perhitungan BMKG dengan persamaan (4-3):

$$T (\text{rata-rata harian}) = (1 \times T_{06} + 2 \times T_{13} + 1 \times T_{18})/4 \quad (4-3)$$

T₀₆ = temperatur pada pukul 06.00, T₁₃ = temperatur pukul 13.00, T₁₈ = temperatur pukul 18.00 (diukur dengan AWS - automatic weather station di tempat yang sama di LAPAN Bandung).

Dari hasil rata-rata harian dilakukan plotting, kemudian dibuat regresi linier diperoleh garis regresi linear $y = 0,0123 x + 17,041$ dengan $R^2 = 0.633$. dari garis tersebut diperoleh gradient temperatur sebesar + 0,0123. Pada kenyataannya kenaikan temperatur cukup signifikan selama satu tahun dari 2008-2009 di Bandung (diambil dari bulan Mei 2008–Mei 2009) dari 18.8°C–23.1°C (4,3°C). Kondisi ini dapat dimaklumi karena peningkatan temperatur terjadi di tengah kota Bandung dan data hanya diambil satu tahun, sehingga perubahan temperatur ini menunjukkan bahwa Kota Bandung semakin panas yang disebut pulau panas (Laras Tursilowati, 2007). Di sisi lain, terjadinya perubahan lahan Bandung yang semakin memprihatinkan dari luas 16.729,65 ha, yang terbangun sudah mencapai 76% (www.ahmadheryawan.com), sedangkan Kota Bandung hanya memiliki ruang terbuka hijau sebesar 8,7% (news.idfinroll.com, diakses 2010). Sebagai contoh terjadinya pulau panas di Ibu Kota Argentina (Buenos Aires) perbedaan temperatur antara kota dengan luar kota sekitarnya mencapai 2.5°C-5°C (Maria Jose Levverato, et.al, 2000). Di Kototabang yang merupakan daerah yang dikelilingi hutan pada tahun 2004-2007 mengalami kenaikan temperatur, sejalan dengan kenaikan CO₂ (lihat Gambar 4-2d, Trismidianto dan Sartono. M, 2008). Di sisi lain akibat uap air makin banyak di udara yang membentuk awan rendah,

menyebabkan penyerapan radiasi panas Bumi lebih banyak lagi sehingga suhu atmosfer makin tinggi. Karena pemanasan yang semakin tinggi, batuan kapur (CaCO₃) yang berada di sekitar Bandung seperti di Padalarang melepaskan CO₂, ditambah dengan pemanasan proses pembuatan gamping akan menambah peningkatan emisi CO₂.

Kesulitan yang dihadapi rosotan CO₂ di Bandung yang dimotori oleh tetumbuhan justru semakin sedikit, karena ruang terbuka hijau semakin menyempit. Akibatnya keseimbangan antara fotosintesa *plus* penambahan pembuangan pembakaran BBM dari kendaraan bermotor dan lainnya dengan respirasi belum seimbang. Sesungguhnya laju peningkatan CO₂ akan semakin berkurang manakala banyak dilakukan penghijauan dengan pepohonan yang masih muda, sehingga penyimpanan karbon pada tetumbuhan akan semakin efektif, yang diharapkan konsentrasi CO₂ akan menurun.

5 KESIMPULAN

Dari hasil pengukuran konsentrasi permukaan pada tahun 2008-2009 di Bandung dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Konsentrasi CO₂ di Bandung tahun 2008 sampai dengan tahun 2009 mengalami kenaikan 1,5 ppm salah satunya karena terjadinya peningkatan transportasi di perkotaan (peningkatan pembakaran BBM).
- Di Bandung, peningkatan konsentrasi CO₂ harian yang cukup signifikan dalam bentuk cuatan, terjadi pada pagi antara pukul 6.00 – 7.30 karena atmosfer masih stabil dan angin tenang, siang hari konsentrasi mulai turun karena fotosintesa dan atmosfer tidak stabil yang diikuti angin sudah mulai kencang, disertai terjadinya dispersi konsentrasi.
- Dari hasil pengukuran temperatur, terjadi kenaikan temperatur selama satu tahun (hanya data riil AWS satu tahun) di Bandung, berdasarkan data regresi linear sebesar 4,3°C dari 18.8°C – 23.1°C.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahmad Heryawan, 2010. *Kota Bandung Semakin Panas*, www.ahmadheryawan.com/..556/-kota-bandung-semakin-panas, diakses Januari 2010.
- Chunaeni Latief, Asif Awaludin, Gun Gun Gunawan, 2008. *Instrumen Pemantau CO₂ di Bandung*, Prosiding Seminar Instrumentasi Berbasis Fisika (SIBF) 2008, ISBN 978-979-96520-4-1, Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Fisika FMIPA ITB.
- GAW Kototabang, data GRK diterima tahun 2008.

- Heinz Huges, diakses 31 July 2008. *The Climate Catastrophe*, <http://www.johndaly.com//artifact.htm>.
- Laras Tursilowati, 2005. *Pulau Panas Perkotaan Akibat Perubahan Tata Guna dan Penutup Lahan di Bandung dan Bogor*, Jurnal Sains Dirgantara vol.3 no.1 (Des.2005), p.43-64.
- Maria Jose Lavverato et.al, 2000. *Boenos Aries Urban Heat Island intensity and environmental impact*, Proc. Of PLEA 2000, Cambridge, UK, p. 533-534.
- Pemkot Bandung, Kota Bandung Semakin Panas, news.id.finnrell.com/.../59/168926-pemkot-bandung-janji-perbanyak-rth.pdf, diakses Januari 2010.
- Run-Lie Shia, Mao-Chang Liang, Charles E. Miller, Yuk L Yung, 2006. *CO₂ in The Upper Troposphere: Influence of Exchange*, Geophysics Research Letters, Vol.33, L14814, doi: 10. 1029/2006GL026141.
- Samsat Kota Bandung, (11 Agustus) 2009 Tahun Depan Bandung Bangun Tol Pasteur Cibiru, Tempo Interaktif Nasional.
- Setiawan Wangsaatmadja, 2008. *Kualitas Udara Menentukan Kualitas Hidup Kita*, Proc. Seminar Nasional Penelitian Polusi Udara dan Ozon LAPAN, ISBN.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2004. Which Represents Wide Consensus of International Scientific Opinion, diakses Februari 2009.
- Tom V. Segalstad, 2008. *Oceans Regulate CO₂, IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change*, Call it propaganda, not science.
- Trismidianto dan Sartono Marpaung, 2008. *Analisis Hubungan Emisi dan Konsentrasi CO₂ dengan Temperatur Permukaan*, Laporan Program RIK LAPAN Tahun 2008.
- Thomas Everth's Green Blog, diakses, 26 Februari 2008.
- Vincent Gray, 2008. <http://www.counterpunch.org/cockburn05262007.html>.
- Wikipedia, carbon dioxide in Earth's atmosphere, diakses Januari 2008.
- Wikipedea, Commons, 2008, diakses Februari 2008.