

EFEK GAS SO₂ DAN KELEMBAPAN UDARA TERHADAP INSOLASI DAN TEMPERATUR DI BANDUNG

[EFFECT OF SO₂ GAS AND HUMIDITY TO INSOLATION AND TEMPERATURE IN BANDUNG]

Tuti Budiwati¹, Saipul Hamdi, dan Dyah Aries Tanti

Peneliti Bidang Komposisi Atmosfer, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lapan

¹e-mail: tuti_lapan@yahoo.com

Diterima 16 April 2014; Disetujui 13 Juni 2014

ABSTRACT

Besides greenhouse gases such as CO₂, N₂O, CH₄, H₂O, and O₃ that potential to to effect incoming solar radiation (insolation) and lead to global warming, on the contrary SO₂ has cooling and warming effect on the earth surface. These gases cause tropospheric and surface warming because part of radiation emitted from the surface is scattered back and the rest is absorbed. Based on Automatic Weathering Station (AWS) and SO₂ monitoring in Bandung (LAPAN) from October 2007- December 2012 it was found that average relative humidity in 2010 was relatively higher than in 2009 i.e. 85% > 78%, on the contrary SO₂ was little. It resulted in 13% insolation decrease from 166 W/m² in 2009 to 145 W/m² in 2010. There is a decrease in the average temperature of 23.69 ° C in 2010 from 23.97 ° C in 2009. Analysis result by using Pearson correlation method showed significant and strong correlation during dry season between SO₂ and insolation i.e. 0.514 (**) with significance $p < 0.01$ and significant but rather weak between humidity and insolation i.e. -0.489(*) with significance $p < 0.05$. In the other hand humidity had stronger influence to insolation during wet season than SO₂. Correlation coefficient numbers between insolation with SO₂ and with humidity during wet season were -0.408(*) with significance $p < 0.05$ and -0.487(**) with significance $p < 0.01$.

Keywords: SO₂, Air humidity, Water vapor, Greenhouse gas, Insolation, Temperature, Pearson's correlation

ABSTRAK

Selain gas rumah kaca seperti CO₂, N₂O, CH₄, H₂O (uap air), dan O₃ yang berpotensi mempengaruhi radiasi matahari yang diterima permukaan bumi (insolasi) dan berakibat terjadi pemanasan, ternyata SO₂ mempunyai efek pendinginan dan pemanasan di permukaan bumi. Gas-gas tersebut mempunyai efek memanaskan troposfer dan permukaan bumi dikarenakan sebagian radiasi yang diemisikan dari permukaan bumi dikembalikan ke bumi dan sebagian lagi diserap. Berdasarkan data monitoring *Automatic Weathering Station* (AWS) dan SO₂ di Bandung (Lapan) dari Oktober 2007 sampai Desember 2012, pada tahun 2010 menunjukkan kelembapan udara rata-rata tinggi yaitu 85% dibandingkan tahun 2009 yaitu 78%, sebaliknya SO₂ kecil. Dampaknya menyebabkan penurunan insolasi tahun 2010 menjadi 145 W/m² dari 166 W/m² tahun 2009 atau 13%. Terdapat penurunan rata-rata temperatur tahun 2010 menjadi 23,69 °C dari 23,97 °C tahun 2009. Hasil analisis dengan metode korelasi Pearson didapati hubungan yang signifikan dan kuat pada musim kering antara SO₂ dengan insolasi yaitu 0,514(**) dengan signifikansi $p < 0,01$ dan signifikan tetapi agak lemah antara kelembapan dengan insolasi yaitu -0,489(*) dengan signifikansi $p < 0,05$. Tetapi sebaliknya pengaruh kelembapan udara kuat pada musim

basah dibandingkan SO₂ terhadap insolasi. Korelasi antara insolasi dengan SO₂ dan kelembapan pada musim basah yaitu -0,408(*) dengan signifikansi $p < 0,05$ dan -0,487(**) dengan signifikansi $p < 0,01$.

Kata kunci: SO₂, Kelembapan udara, Uap air, Gas rumah kaca, Insolasi, Temperatur, Korelasi Pearson

1 PENDAHULUAN

Bila terdapat pembakaran bahan bakar fosil maka akan diemisikan gas-gas telusur seperti gas rumah kaca dan SO₂ ke atmosfer. Gas rumah kaca (*Green House Gases*) seperti CO₂, N₂O, CH₄, H₂O (uap air), dan O₃ mempunyai efek memanaskan troposfer dan permukaan bumi dikarenakan sebagian radiasi yang diemisikan dari permukaan bumi dikembalikan ke bumi dan sebagian diserap. Gas-gas rumah kaca yang paling berpengaruh adalah uap air yang konsentrasinya tidak dipengaruhi oleh aktivitas manusia secara langsung, berikutnya adalah CO₂ yang diramalkan naik secara berlebihan di masa yang akan datang, dan CH₄ walaupun jumlahnya sedikit namun mempunyai *radiative forcing* tinggi. Gas-gas ini mempunyai umur yang panjang di atmosfer dan sifat-sifat absorpsi memungkinkan untuk berinteraksi dengan radiasi inframerah (gelombang panjang) *terrestrial* yaitu radiasi yang dari permukaan bumi. Hal yang perlu diperhatikan adanya perubahan komposisi kimia dan interaksi antara kimia dan iklim (Isaksen et al., 2009).

Selain gas-gas rumah kaca yang disebutkan terdahulu, ternyata SO₂ mempunyai kemampuan pula dalam menyeimbangkan temperatur yang naik karena gas rumah kaca, dan dalam 10-30 tahun ke depan kemungkinan kenaikan *radiative forcing* yang disebabkan oleh perubahan konsentrasi SO₂ dapat menggantikan penurunan *radiative forcing* yang disebabkan penurunan emisi CO₂ (Wigley, 1989). Dikarenakan kenaikan gas SO₂ secara luas di belahan bumi Utara (*Northern Hemisphere*), memungkinkan pendinginan di belahan bumi Utara (*Northern Hemisphere*) relatif sampai Selatan (*Southern*) (Schwartz, 1988). Maka gas SO₂ yang telah berubah sebagai sulfat aerosol dipertimbangkan dapat mendinginkan atmosfer karena efek albedo yang ditimbulkannya. Gas SO₂ bukan gas rumah kaca tetapi prekursor dari sulfat (H₂SO₄) aerosol atmosfer. Aerosol menyebabkan radiasi matahari yang diterima permukaan bumi terhalang albedo, sehingga terjadi penurunan suhu dan menjadi dingin. Selain itu SO₂ merupakan sumber utama dari hujan asam dan deposisi asam. McCormick dan Ludwig (1967) menyatakan bahwa kenaikan aerosol atmosfer dapat menyebabkan kenaikan albedo, karena itu mendinginkan bumi. Dampak albedo tergantung pada ketebalan optik, sifat-sifat absorpsi aerosol, ukuran penyebaran dan indek refraksi. Secara historik, sebagian besar letusan gunung berapi menyebabkan terbentuknya aerosol sulfat di lapisan stratosfer bawah dan mendinginkan permukaan bumi atau menurunkan kira-kira 0,5°C selama 3 tahun (Ward, 2009).

Salah satu masalah yang utama pada lingkungan adalah pemanasan yang ditimbulkan oleh radiasi matahari yang diterima permukaan bumi, dan salah satu faktor yang mempengaruhi radiasi matahari yang diterima permukaan bumi adalah kelembapan udara. Kelembapan udara adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan jumlah uap air yang terkandung di dalam campuran air-udara dalam fasa gas dalam %. Adapun uap air yaitu H₂O adalah salah satu dari gas rumah kaca. Kandungan uap air dalam atmosfer dapat dalam wujud awan yang mempengaruhi kelembapan udara. Awan mempunyai peranan dalam menghamburkan dan merefleksikan radiasi matahari ke atmosfer (Pidwirny, 2006).

Masalah kesetimbangan radiasi matahari akan dapat menjelaskan efek rumah kaca yang berperan dalam mempengaruhi temperatur permukaan. Gas rumah kaca

yang paling besar menyerap *Outgoing Longwave Radiation* (OLR) adalah uap air. OLR adalah radiasi gelombang panjang yang lolos ke atmosfer. Besarnya OLR ini menunjukkan suhu puncak dan kandungan uap air atmosfer. Besarnya radiasi matahari yang diterima permukaan bumi tergantung pada posisi bumi mengelilingi matahari. Maka radiasi matahari yang sampai ke bumi tergantung pada musim. Tetapi dengan adanya gas rumah kaca akan terdapat perubahan pula.

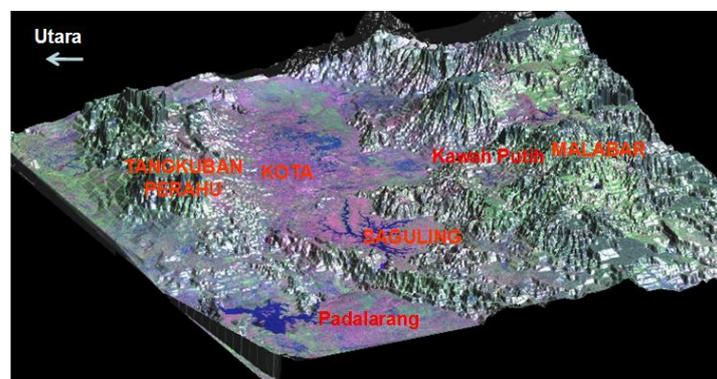
Radiasi matahari tidak semuanya sampai di bumi, hanya 50,1% yang mencapai bumi sisanya diserap oleh awan dan gas-gas yang ada di atmosfer. Energi tersebut digunakan untuk memanaskan permukaan bumi dan atmosfer bawah, juga mencairkan dan menguapkan air, dan digunakan untuk fotosintesis tumbuh-tumbuhan. Bagian 49% lainnya, yaitu 4% direfleksikan kembali ke atmosfer oleh permukaan bumi, 26% dihamburkan dan direfleksikan ke atmosfer oleh awan dan partikel-partikel atmosfer, dan 19% diserap oleh gas-gas, partikel-partikel, dan awan (Pidwirny, 2006). Radiasi yang diserap oleh permukaan bumi kemudian diubah dalam bentuk panas menjadi radiasi gelombang panjang. Radiasi dari permukaan bumi selanjutnya dipantulkan ke atmosfer, sebagian ada yang lolos ke angkasa dan sebagian lagi diserap oleh gas-gas rumah kaca yang ada di atmosfer. Besar kecilnya kesetimbangan radiasi matahari sangat ditentukan oleh radiasi yang datang (*incoming*) dan radiasi yang dipancarkan (*outgoing*).

Dalam makalah ini, akan dibahas pengaruh SO₂ dan kelembapan udara terhadap insolasi dan temperatur di daerah perkotaan seperti kota Bandung dengan tingkat polusi yang cukup tinggi. Hipotesanya adalah SO₂ dapat menaikkan insolasi di perkotaan Bandung. Bandung adalah kota yang sangat spesifik topografinya, karena dikelilingi oleh gunung-gunung yang membentuk cekungan, berada pada ketinggian 743 m di atas permukaan laut.

2 DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Data

Kelembapan udara, temperatur permukaan dan radiasi matahari yang diterima permukaan bumi (insolasi) diukur dengan AWS-DAVIS tipe Vantage Pro 2™ selama bulan Oktober 2007 sampai Desember 2012 di kota Bandung {107° 35'BT; 6° 54' LS, tepatnya di Jl. DR. Djundjunaan 133} dengan dikelilingi oleh gunung-gunung yang aktif mengeluarkan gas belerang maupun gas SO₂ seperti Tangkuban Perahu di utara, Kawah Putih MALABAR di selatan dan lainnya (Gambar 2-1). Kota Bandung sebagai ibukota Provinsi Jawa Barat berkembang menjadi kota pariwisata dengan kepadatan transportasi yang cukup tinggi di Indonesia. Sumber SO₂ berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dari industri dan transportasi serta sumber alamiah gunung berapi.



Pusat Pengembangan Pemanfaatan dan Teknologi Penginderaan Jauh
Deputi Bidang Penginderaan Jauh, LAPAN

Gambar 2-1: Peta Kota Bandung dikelilingi oleh gunung-gunung yang aktif mengeluarkan gas belerang (sumber: Deputi Bidang Penginderaan Jauh, LAPAN)

Data SO₂ berasal dari pengamatan bulanan dengan *passive sampler* (*sampling* secara pasif), selanjutnya dilarutkan dalam air demineral dan dianalisa dengan *Ion Chromatography* Dionex 1500. Pengamatan SO₂ dilakukan secara kontinu bersamaan dengan AWS di gedung Lapan (Bandung) pada lantai 5 di ruang terbuka.

2.2 Metodologi Penelitian

Data dari alat AWS dicatat tiap 5 menit, selanjutnya data kelembapan udara (%), temperatur (°C) dan insolasi (Watt/m² atau W/m²) dirata-ratakan per jam dan bulan. Analisis deskripsi dan variasi musiman dibuat berdasarkan data *time series* bulanan selama Oktober 2007 sampai Desember 2012. Kemudian data SO₂, kelembapan udara, insolasi dan temperatur dikelompokkan dalam musim kering yaitu berlangsung dari bulan Juni hingga Nopember, sedangkan musim basah dari bulan Desember hingga Mei setiap tahunnya (Mc. Gregor dan Nieuwolt, 1998). Hal ini dilakukan untuk analisis statistik secara deskripsi dan korelasi antara parameter tersebut.

Analisis dampak kelembapan udara terhadap insolasi dan temperatur dengan metode korelasi Pearson untuk tingkat kepercayaan 95% atau α (*alpha*) = 0,05* (Seni, 2005). Nilai koefisien korelasi (*r*) berada antara 1 dan -1 ($-1 \leq r \leq 1$). Variabel-variabel dikatakan memiliki korelasi yang kuat jika 0,5 atau lebih kecil dari -0,5. Untuk uji pengaruh antar *variabel-variabel* digunakan nilai *probabilitas* (*p-value*) atau tertulis *significance* (SIG). Jika *p-value* nilainya lebih rendah daripada α maka pengaruh antar *variabel* dikatakan signifikan, sedangkan jika nilainya lebih tinggi maka berarti pengaruh antar variabel tidak signifikan (Seni, 2005).

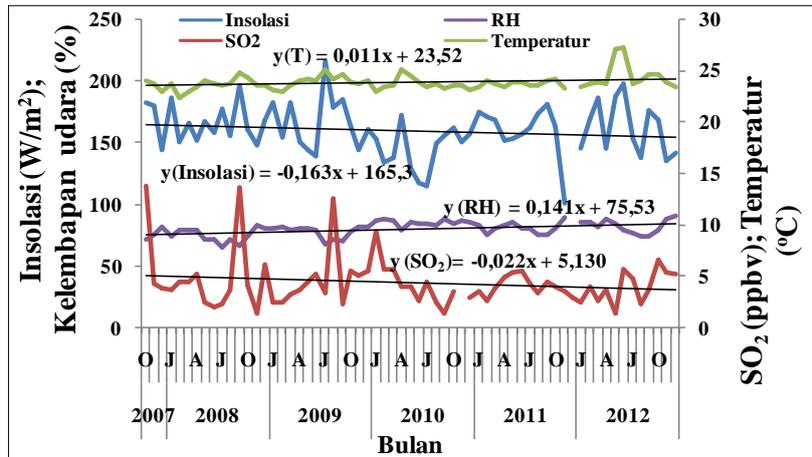
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Variasi SO₂, Temperatur, Kelembapan Udara, Insolasi

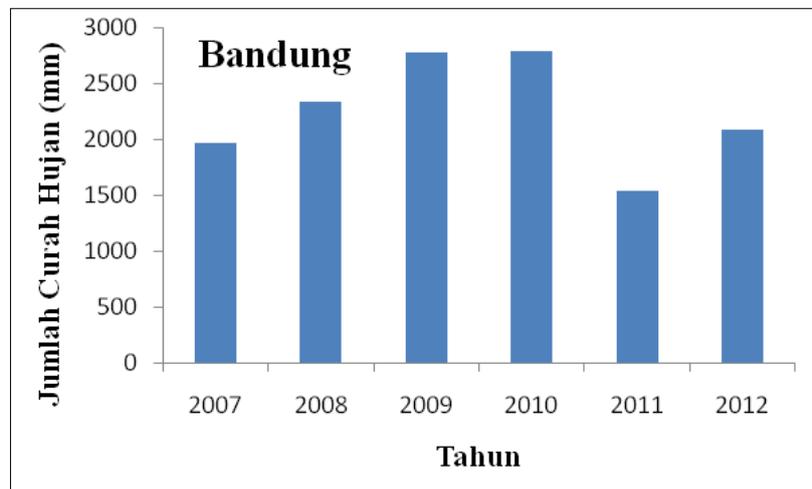
Gambar 3-1 memperlihatkan variasi musiman dan tren dari SO₂, temperatur, kelembapan udara dan insolasi selama 2007-2012 di Bandung. Terlihat sekali pada Gambar 3-1 bahwa konsentrasi SO₂ dan insolasi berfluktuatif dengan tajam. Konsentrasi SO₂ mencapai maksimum pada musim kemarau pada Oktober 2007, September 2008 dan Agustus 2009 dengan nilai 13,73 ppbv; 13,67 ppbv dan 12,62 ppbv. Perbedaan konsentrasi SO₂ dari waktu ke waktu disebabkan pengaruh sumber antropogenik dari transportasi di wilayah Cipedes yang padat terutama jalan utama gerbang Pasteur yang melewati tempat pemantauan dengan jarak 50 m. Jarak gerbang Pasteur dengan tempat pemantauan sekitar 500 m. Variasi SO₂ yang berfluktuatif tajam dengan nilai rata-rata 4,42 ppbv dan standar deviasi 2,48 ppbv dengan koefisien variasi yang cukup tinggi yaitu 56,14% (Tabel 3-1).

Variasi insolasi cukup tinggi dengan standar deviasi sebesar 20,82 (W/m²) menandakan perubahan yang cukup signifikan. Perubahan insolasi tersebut berfluktuatif dengan perubahan konsentrasi SO₂ dan kelembapan udara. Penurunan insolasi tahun 2010 ternyata disebabkan kelembapan udara yang tinggi pada tahun tersebut, sedangkan konsentrasi SO₂ juga turun. Kelembapan udara yang tinggi hampir sepanjang tahun tentunya terkait dengan awan-awan yang terbentuk dan mempengaruhi penurunan insolasi. Pembentukan awan dipicu oleh adanya aerosol sebagai inti awan, sedangkan aerosol dapat terbentuk dari gas SO₂. Jumlah curah hujan tahun 2010 di Bandung mencapai 2780 mm cukup tinggi dibandingkan tahun-tahun sebelumnya maupun sesudahnya (Gambar 3-2). Sebaliknya tahun 2007, 2008 dan 2009 pada waktu musim kemarau dimana kelembapan turun dan tingkat konsentrasi SO₂ naik, ternyata insolasi naik. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Wigley (1989) tentang kenaikan *radiative forcing* yang disebabkan oleh kenaikan konsentrasi SO₂. Diduga terdapat peran SO₂ dalam menaikkan insolasi selain tingkat

kelembapan yang rendah. Hal ini dapat dijelaskan lebih mendalam dengan membedakan musim pada sub bagian berikutnya.



Gambar 3-1: Variasi musiman dan tren dari SO₂, temperatur (T), kelembapan udara (RH) dan insolasi selama 2007-2012 di Bandung



Gambar 3-2: Jumlah curah hujan tahunan di Bandung dari 2007 sampai 2012

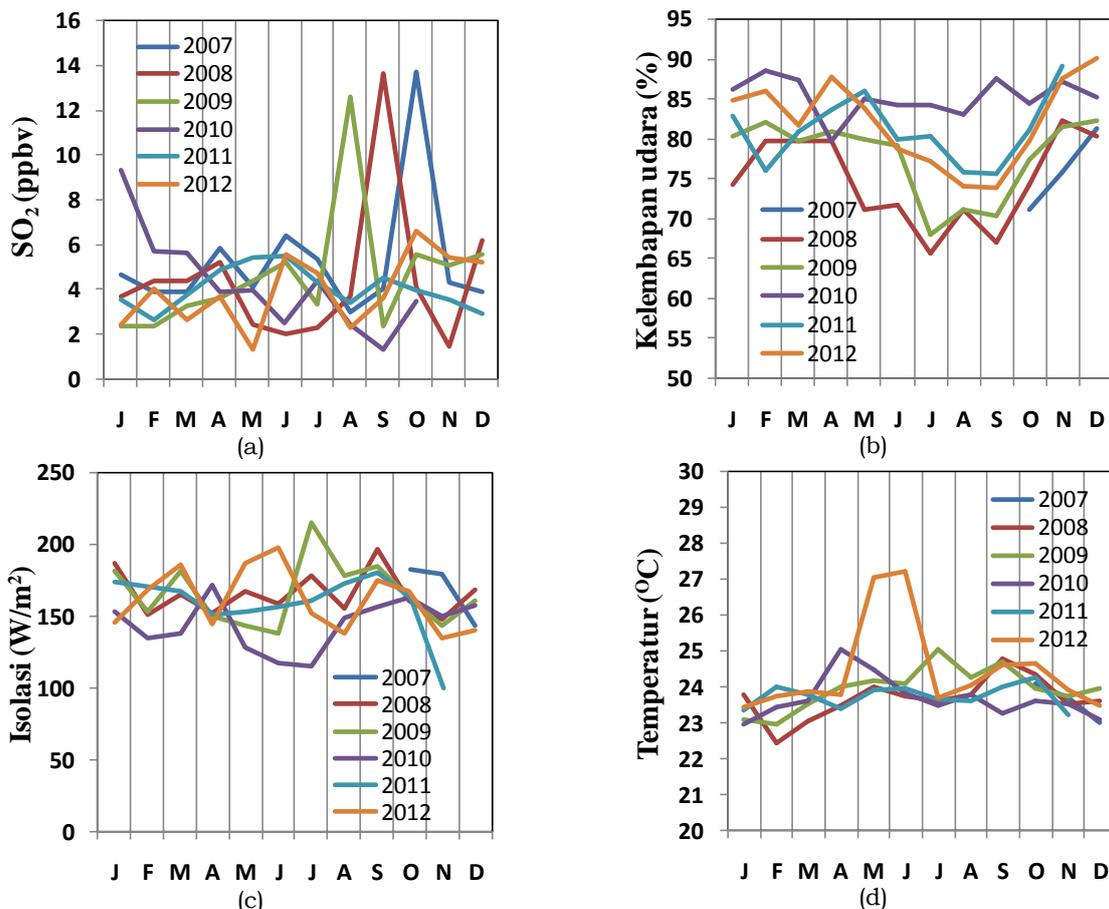
Pada tahun 2010 didapati kelembapan udara rata-rata yang tinggi yaitu 85% dibandingkan tahun 2009 yaitu 78%. Pada saat tersebut hampir sepanjang tahun terjadi hujan di Bandung. Sebaliknya SO₂ rata-rata kecil pada tahun 2010 dibandingkan tahun 2009. Dampaknya menyebabkan penurunan insolasi tahun 2010 menjadi 145 W/m² dari 166 W/m² tahun 2009 atau 13%. Terdapat penurunan rata-rata temperatur tahun 2010 menjadi 23,69 °C dari 23,97 °C tahun 2009.

Variasi temperatur yang mempunyai nilai rata-rata 23,90 °C dengan standar deviasi 0,78 °C dan koefisien variasi yang kecil yaitu 3,28% menandakan tidak terlalu berfluktuasi. Temperatur maksimum terjadi pada musim kering adalah 27,22 °C dan minimum 22,43 °C pada musim basah. Fluktuasi nilai radiasi matahari cukup tinggi dengan koefisien variasi 13% (Tabel 3-1), hal ini tentunya dipengaruhi oleh besar kecilnya kelembapan udara, perubahan konsentrasi gas-gas rumah kaca dan juga aerosol yang merupakan turunan dari gas SO₂. Gas-gas, aerosol, dan partikulat di atmosfer mempertahankan kesetimbangan radiasi yang dinamis seperti bahwa energi radiasi dari top atmosfer yaitu dari matahari sama dengan energi yang dipantulkan dari bumi dan atmosfer sendiri (Siegenthaler et al., 2005). Smith et al. (2001; 2004) dan Ward (2009) menyatakan bahwa emisi SO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil (sumber antropogenik) berkorelasi dengan kenaikan temperatur. Temperatur naik secara sedang (moderat) sebelum 1950 ketika sulfur antropogenik naik secara pelan, dan temperatur

naik dengan cepat sejak 1950 ketika sulfur antropogenik naik dengan cepat dan mencapai puncaknya sekitar 1980 (Ward, 2009).

Tabel 3-1: NILAI RATA-RATA, MAKSIMUM, MINIMUM, STANDAR DEVIASI (STD.DEV.) DAN KOEFISIEN VARIASI (KOEf.VAR.) DARI SO₂, KELEMBAPAN UDARA, INSOLASI DAN TEMPERATUR SELAMA OKTOBER 2007 SAMPAI DESEMBER 2012 DI BANDUNG

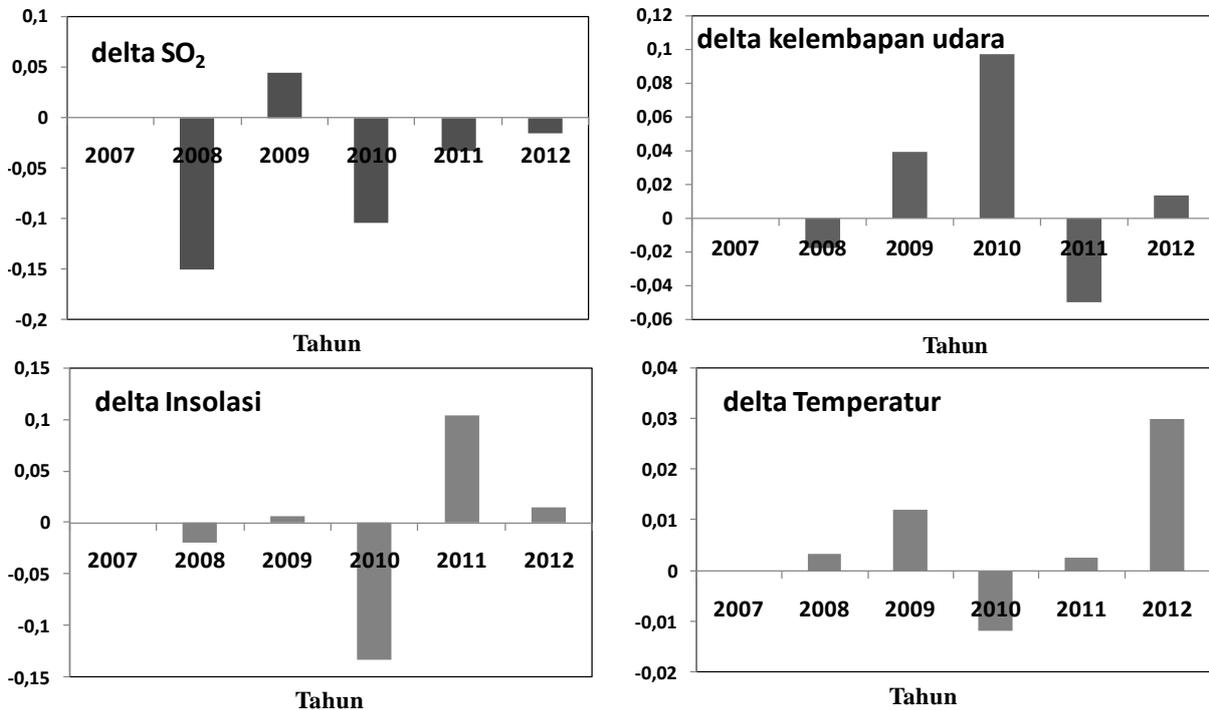
| | Rata-rata | Maksimum | Minimum | Std.dev. | Koef.Var.% |
|------------------------------|-----------|----------|---------|----------|------------|
| SO ₂ (ppbv) | 4,42 | 13,73 | 1,32 | 2,48 | 56,14 |
| Kelembapan udara (%) | 80 | 90 | 66 | 5,9 | 7,3 |
| Insolasi (W/m ²) | 160,2 | 215,6 | 100,5 | 20,8 | 13,0 |
| Temperatur (°C) | 23,90 | 27,20 | 22,40 | 0,80 | 3,30 |



Gambar 3-3: Variasi musiman dan antar tahun dari a) SO₂, b) kelembapan udara, c) insolasi dan d) temperatur selama 2007-2012 di Bandung

Pengaruh SO₂ terhadap insolasi terlihat pada bulan-bulan Oktober 2007, September tahun 2008 dan Agustus 2009 (Gambar 3-3). Dampaknya insolasi naik secara signifikan dan selanjutnya temperatur juga menjadi lebih tinggi dibandingkan pada bulan-bulan musim basah (Februari sampai dengan Mei) dengan konsentrasi SO₂ yang tidak naik atau rendah. Pada Gambar 3-3 memperlihatkan insolasi tinggi pada musim kemarau Juni-Juli-Agustus dan akibatnya temperatur juga naik pada bulan-bulan tersebut. Pada Mei tahun 2012 terlihat insolasi cukup tinggi dan disertai dengan temperatur cukup tinggi pula (Gambar 3-3). Tetapi kelembapan udara agak menurun pula meskipun masih tinggi dibandingkan musim kering seperti Juni sampai September dan SO₂ juga turun pada waktu yang bersamaan. Hal ini kemungkinan adanya parameter gas rumah kaca lainnya yang tinggi seperti CO₂ dan CH₄. Peranan

SO₂ dalam menurunkan temperatur terkait dengan pembentukan aerosol sulfat. Aerosol sulfat akan menjadi inti kondensasi dan selanjutnya akan berperan dalam pembentukan awan. Maka dengan terbentuknya awan akan menyebabkan kelembapan udara menjadi tinggi.



Gambar 3-4: Perbedaan nilai (delta) antar tahun (sumbu y) dari SO₂, temperatur, kelembapan udara dan insolasi (pada sumbu x) selama 2007-2012 di Bandung

Perbedaan nilai antar tahun yaitu $(P_i - P_{i-1}) / P_{i-1}$ dimana P_i = nilai tahun saat i dan P_{i-1} = nilai tahun sebelumnya digunakan untuk menganalisis perbedaan tahun berjalan dengan tahun sebelumnya (Gambar 3-4). Konsentrasi SO₂ adalah kecil pada tahun 2008 dan 2010, demikian pula insolasi. Adapun kelembapan udara terlihat tinggi pada tahun 2010 dan berdampak pada penurunan temperatur pada tahun tersebut (Gambar 3-3b dan Gambar 3-3d). Terdapat keterkaitan pula dengan jumlah curah hujan tinggi pada tahun 2010 (Gambar 3-2), berarti terdapat pembentukan awan karena adanya aerosol tentunya dan berkorelasi dengan penurunan SO₂.

Tabel 3-2: STATISTIK DESKRIPTIF DARI SO₂, KELEMBAPAN UDARA, INSOLASI DAN TEMPERATUR SELAMA OKTOBER 2007 SAMPAI DESEMBER 2012 DI BANDUNG

| Desember-Mei (musim basah) | Rata-rata | Std. dev. | N (jumlah data) | Juni-Nopember (kering) | Rata-rata | Std. dev. | N (jumlah data) |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| Temperatur (°C) | 23,70 | 0,80 | 29 | Temperatur(°C) | 24,10 | 0,76 | 25 |
| Kelembapan udara (%) | 82 | 4,0 | 29 | Kelembapan udara (%) | 76 | 5,5 | 25 |
| Insolasi (W/m ²) | 160,4 | 16,4 | 29 | Insolasi (W/m ²) | 166,8 | 15,7 | 25 |
| SO ₂ (ppbv) | 4,03 | 1,55 | 30 | SO ₂ (ppbv) | 4,92 | 3,46 | 25 |

Dari Tabel 3-2 perbedaan nilai rata-rata temperatur dan kelembapan udara pada musim basah dan kering tidak terlalu besar di Bandung, sekitar 0,4°C (naik 1,7%) dan 6% (turun 7%). Demikian pula perbedaan nilai rata-rata insolasi dan konsentrasi SO₂ yaitu 6,4 (W/m²) atau naik 4% dan 0,89 (ppbv) naik 21%. Dengan kenaikan konsentrasi SO₂ yang ditandai pula dengan kenaikan insolasi dan kenaikan temperatur, menjawab hipotesa bahwa SO₂ menaikkan insolasi.

3.2 Korelasi

Untuk mengetahui pengaruh atau hubungan SO₂ terhadap kelembapan udara juga terhadap insolasi dan temperatur, maka dilakukan analisis statistik dengan metode korelasi Pearson. Korelasi Pearson digunakan untuk menguji hubungan antar parameter tersebut dengan signifikansi $p < 0,01$ dan $p < 0,05$. Hasil korelasi dibuat matrik seperti diperlihatkan pada Tabel 3-3.

Dari Tabel 3-3 terlihat bahwa pada musim basah (hujan) di Bandung terdapat hubungan yang moderat atau sedang antara insolasi dengan kelembapan udara dengan angka korelasi -0,487(**) dan sangat signifikan dengan nilai 0,007 berarti nilai probabilitas (*p-value*) $p < 0,01$. Nilai negatif berarti kelembapan udara tinggi telah menurunkan insolasi dengan terbentuknya awan-awan. Hal tersebut didukung pula oleh hubungan yang moderat antara konsentrasi SO₂ dengan insolasi yang signifikan pada 0,028 dengan $p < 0,05$ dan angka korelasi -0,408(*). Pada musim basah di Bandung, awan secara signifikan mempengaruhi insolasi dengan moderat, meskipun hanya 50%. Kondisi ini menunjukkan adanya faktor lainnya yang mempengaruhi pelemahan insolasi, misalnya aerosol sulfat. Hubungan temperatur dengan parameter kelembapan udara, insolasi dan konsentrasi SO₂ pada musim basah di Bandung ternyata cukup rendah, yaitu di bawah 0,40. Angka korelasi di bawah $< 0,40$ baik plus maupun minus menunjukkan tingkat hubungan yang rendah (Sulaiman, 2004).

Tabel 3-3: MATRIK KORELASI DARI SO₂, KELEMBAPAN UDARA, INSOLASI DAN TEMPERATUR SELAMA OKTOBER 2007 SAMPAI DESEMBER 2012 PADA MUSIM BASAH DI BANDUNG. N ADALAH JUMLAH DATA

| Musim basah (Desember-Mei) | | Temperatur | Kelembapan udara | Insolasi |
|----------------------------|------------------|------------|------------------|-----------|
| Kelembapan udara | Korelasi Pearson | -0,014 | | |
| | Sig. | 0,943 | | |
| | N | 29 | | |
| Insolasi | Korelasi Pearson | 0,293 | -0,487(**) | |
| | Sig. | 0,123 | 0,007 | |
| | N | 29 | 29 | |
| SO ₂ | Korelasi Pearson | -0,325 | 0,328 | -0,408(*) |
| | Sig. | 0,086 | 0,082 | 0,028 |
| | N | 29 | 29 | 29 |

**Korelasi adalah signifikan (sig.) pada level 0,01

* Korelasi adalah signifikan (sig.) pada level 0,05

N: Jumlah data

Berdasarkan tabel *radiative forcing* iklim dari IPCC (2007), nilai *radiative forcing* karena efek radiasi langsung dari aerosol dengan cara penghamburan adalah -0,5 watt/m² dan nilai *radiative forcing* karena efek radiasi tidak langsung dari awan (efek albedo awan) adalah -0,7 watt/m². Tanda negatif menunjukkan radiasi yang dihamburkan oleh aerosol dan awan lebih besar dibandingkan yang diserap. Maka awan lebih banyak menurunkan temperatur dibandingkan aerosol karena nilai negatif *radiative forcing* awan lebih besar dari aerosol. Maka musim basah terdapat korelasi yang signifikan pula antara kelembapan udara dengan insolasi meskipun angkanya kecil karena tidak dominan.

Tabel 3-4: MATRIK KORELASI DARI SO₂, KELEMBAPAN UDARA, INSOLASI DAN TEMPERATUR SELAMA OKTOBER 2007 SAMPAI DESEMBER 2012 PADA MUSIM KERING DI BANDUNG N ADALAH JUMLAH DATA

| Musim kering (Juni-Nopember) | | Temperatur | Kelembapan udara | Insolasi |
|------------------------------|------------------|------------|------------------|-----------|
| Kelembapan udara | Korelasi Pearson | -0,164 | | |
| | Sig. | 0,434 | | |
| | N | 25 | | |
| Insolasi | Korelasi Pearson | 0,597(**) | -0,489(*) | |
| | Sig. | 0,002 | 0,013 | |
| | N | 25 | 25 | |
| SO ₂ | Korelasi Pearson | 0,293 | -0,391 | 0,514(**) |
| | Sig. | 0,156 | 0,053 | 0,009 |
| | N | 25 | 25 | 25 |

**Korelasi adalah signifikan (sig.) pada level 0,01

*Korelasi adalah signifikan (sig.) pada level 0,05

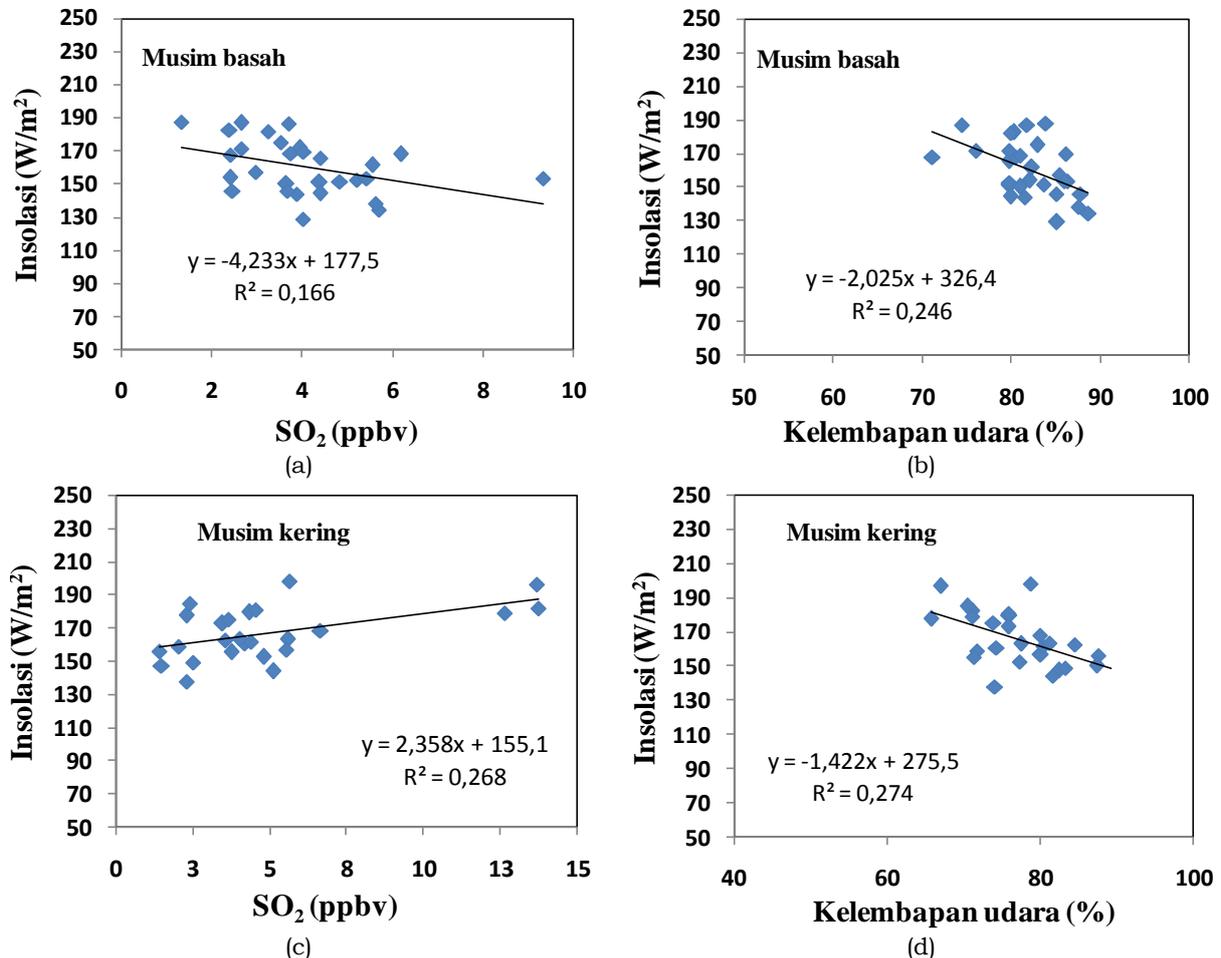
N: Jumlah data

Tabel 3-4 memperlihatkan bahwa pada musim kering di Bandung terdapat hubungan yang substansial antara insolasi dengan temperatur dengan angka korelasi 0,597(**) dan signifikan 0,002 < 0,01 yang menunjukkan signifikansi yang kuat. Demikian pula hubungan antara insolasi dengan kelembapan udara dengan angka korelasi -0,489(*) dan signifikan 0,013 berarti nilai *probabilitas p* < 0,05. Nilai negatif pada musim kering berarti kelembapan udara tinggi telah menurunkan insolasi dengan terbentuknya awan-awan. Kondisi ini menunjukkan adanya faktor lainnya yang mempengaruhi pelemahan insolasi, misalnya aerosol sulfat. Pada musim kering tersebut ditemukan hubungan yang kuat antara konsentrasi SO₂ dengan insolasi yang cukup signifikan sebesar 0,009 dengan *p* < 0,01 dan angka korelasi 0,514(**). Nilai positif menjelaskan bahwa konsentrasi SO₂ tinggi akan menyebabkan insolasi juga tinggi dan berdampak pada kenaikan temperatur. Sebaliknya konsentrasi SO₂ yang tinggi tidak menyebabkan kelembapan udara tinggi, hal ini terlihat dari hubungan yang menunjukkan angka negatif dan lemah karena tidak dominan. Hubungan temperatur dengan parameter kelembapan udara, dan konsentrasi SO₂ pada musim kering di Bandung ternyata cukup rendah, yaitu di bawah 0,40.

Dari Tabel 3-4 terlihat bahwa efek SO₂ secara langsung terhadap insolasi terkait dengan perubahan *radiative forcing* karena sulfat aerosol, yang secara proporsional berdasarkan perubahan konsentrasi SO₂. Mengingat waktu tinggal SO₂ dalam periode minggu, maka perubahan konsentrasi SO₂ harus paralel dengan perubahan emisi (Wigley, 1991). SO₂ adalah gas aktif secara kimia yang paling banyak diemisikan gunung berapi dan pembakaran bahan bakar minyak dari transportasi, selanjutnya dioksidasi menjadi asam sulfat secara normal dalam satu minggu. Konsentrasi SO₂ dalam jumlah yang sedikit ternyata mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap iklim (Ward, 2009). Pengaruh tidak langsung SO₂ melalui perubahan albedo awan, dimana perubahan konsentrasi *cloud-condensation-nuclei* (CCN) berhubungan *linear* terhadap perubahan konsentrasi aerosol. Perubahan konsentrasi aerosol berhubungan *linear* terhadap perubahan konsentrasi SO₂ (Wigley, 1991). Dampak letusan gunung berapi ternyata menurut Ward (2009) telah menyebabkan terbentuknya aerosol sulfat di lapisan stratosfer bawah dan mendinginkan permukaan bumi atau menurunkan hampir kira-kira 0,5 °C selama 3 tahun.

Angka hubungan antara konsentrasi SO₂ dengan parameter temperatur pada dua musim yang berbeda di Bandung adalah cukup rendah yaitu di bawah 0,40. Tetapi

menunjukkan angka positif pada musim kering yaitu konsentrasi SO₂ tinggi akan diikuti oleh naiknya temperatur meskipun masih kecil. Sebaiknya pada musim basah, hubungan konsentrasi SO₂ dengan temperatur berbanding terbalik (tanda negatif) yaitu SO₂ tinggi diikuti oleh penurunan temperatur. Hal ini menunjukkan terdapat pengaruh kelembapan udara yang cukup tinggi pada musim basah.



Gambar 3-5: SO₂ vs Insolasi dan Kelembapan udara vs Insolasi pada musim a) basah dan b) kering dari Oktober 2007 sampai Desember 2012 di Bandung

Hasil hubungan SO₂ dengan insolasi pada musim basah (Gambar 3-5a) memperlihatkan bahwa konsentrasi SO₂ semakin tinggi maka insolasi turun. Koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,17 menunjukkan bahwa sebesar 17% variansi dari insolasi dapat dijelaskan oleh SO₂ sedangkan 73% oleh parameter lainnya. Dalam hubungan antara konsentrasi SO₂ dengan insolasi didapati angka korelasi sebesar 0,41. Berbeda dengan hubungan antara kelembapan udara dengan insolasi yang lebih kuat atau moderat yaitu 0,50 dan kelembapan udara dapat menjelaskan 25% variansi dari insolasi pada musim basah. Sisanya 75% variansi dari insolasi dijelaskan oleh faktor lainnya. Kelembapan udara yang meningkat pada musim basah telah menurunkan insolasi (Gambar 3-5a).

Dari makalah Ward (2009) menjelaskan konsentrasi SO₂ di atmosfer memprakarsai perubahan iklim secara global pada empat tingkatan kondisi SO₂ dari lemah, moderat, tinggi dan ekstrim dan pengaruhnya pada perubahan iklim global. Dikatakan pada kondisi emisi konsentrasi SO₂ lemah dampaknya terjadi pendinginan dan kemarau selama dasawarsa (sepuluh tahun), hal tersebut dikarenakan kekurangan SO₂ memberikan kemampuan oksidasi atmosfer diperbaiki juga dan terjadi pembersihan atmosfer melalui oksidasi polutan-polutan, sehingga menurunkan

kemampuan atmosfer dan menghambat hujan. Pada kondisi moderat telah menimbulkan pendinginan selama beberapa tahun, hal tersebut dikarenakan terjadi pembentukan lapisan asam sulfat di lapisan stratosfer bawah dan memantulkan panas radiasi ke atmosfer. Berbeda pada kondisi letusan yang menghasilkan kecepatan emisi SO₂ yang tinggi dan ekstrim telah mengaktifkan kemampuan oksidasi atmosfer dan menimbulkan gas-gas rumah kaca dan polutan terakumulasi sehingga berdampak pada pemanasan global dan hujan asam.

Pada musim kering diperoleh hubungan antara SO₂ dan insolasi yang berbeda dengan pada musim basah. Konsentrasi SO₂ tinggi diikuti pula oleh kenaikan nilai insolasi dengan angka korelasi 0,52 dan dapat dijelaskan bahwa 27% dari variansi insolasi dapat dijelaskan oleh konsentrasi SO₂ (Gambar 3-5b). Nilai konsentrasi tinggi pada musim kering ternyata mengaktifkan kemampuan oksidasi atmosfer dan menimbulkan gas-gas rumah kaca dan polutan terakumulasi, akibatnya mempengaruhi kenaikan insolasi.

4 KESIMPULAN

Hubungan temperatur dengan parameter kelembapan udara, insolasi dan konsentrasi SO₂ pada musim basah di Bandung ternyata cukup rendah, yaitu di bawah 0,40. Sedang pada musim kering temperatur berkorelasi dengan kuat terhadap insolasi dan menunjukkan angka positif, tetapi lemah terhadap kelembapan udara dan konsentrasi SO₂ yaitu di bawah 0,40. Angka hubungan antara konsentrasi SO₂ dengan parameter temperatur pada dua musim yang berbeda yaitu musim basah dan kering di Bandung adalah cukup rendah yaitu di bawah 0,40. Hal ini dikarenakan perbedaan konsentrasi SO₂ tidak dominan dengan koefisien variasi 56,14%. Perbedaan rata-rata konsentrasi SO₂ tidak besar karena pada musim basah SO₂ sebesar 4,03 ppbv dan musim kering yaitu sebesar 4,92 ppbv. Tetapi menunjukkan angka positif pada musim kering yaitu konsentrasi SO₂ tinggi akan diikuti oleh naiknya temperatur meskipun kecil. Sebaiknya pada musim basah, hubungan konsentrasi SO₂ dengan temperatur berbanding terbalik (tanda (-)) yaitu SO₂ tinggi akan diikuti oleh penurunan temperatur.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ mempengaruhi insolasi pada musim basah dan kering secara berbalikan. Pada musim kering terlihat potensi SO₂ dalam mempengaruhi insolasi lebih besar karena tidak menjadi aerosol sulfat yang potensial dalam pembentukan awan.

DAFTAR RUJUKAN

- Hu, G.P., Balasubramanian R., dan Wu C.D., 2003. *Chemical Characteristics of Rainwater at Singapore*, Atmospheric Environment, No. 51, hal 747 – 755.
- IPCC, 2007. *Climate Change 1992, The Supplemental Report to The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press.
- Isaksen, I.S.A., Granier, C., Myhre, G., Berntsen, T.K., Dalsøren, S.B., Gauss, M., Klimont, Z., Benestad, R., Bousquet, P., Collins, W., Cox, T., Eyring, V., Fowler, D., Fuzzi, S., Joöckel, P., Laj, P., Lohmann, U., Maione, M., Monks, P., Prevo, A.S.H., Raes, F., Richter, A., Rognerud, B., Schulz, M., Shindell, D., Stevenson, D.S., Storelvmo, T., Wang, W.C., van Weele, M., Wild, M., dan Wuebbles, D., 2009. *Atmospheric Composition Change: Climate-Chemistry Interactions*, Atmospheric Environment 43, 5138–5192.
- Lenoble, J., 1993. *Atmospheric Radiative Transfer*, A. Deepak Publishing, Hampton-Virginia USA, hal. 223-243.
- Mc Cormick dan Ludwig, 1967. *Climate modification by Atmospheric Aerosols*, Science, 156, 1358-1359.

- Mc. Gregor G.R. dan Nieuwolt S., 1998. *Tropical Climatology: An Introduction to the Climates of the Low Latitudes*, second edition, John Wiley & Sons, pp. 125-133.
- Pidwirny, M., 2006. *Atmospheric Effects on Incoming Solar Radiation*, Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Date Viewed. [http:// www. physicalgeography. net/fundamentals/7f.html](http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html).
- Seni, M. S., 2005. Tugas makalah: *Analisis Multiregresi*, STT Telkom Bandung, <http://www.stttelkom.ac.id>.
- Schwartz, S. E., 1988. *Are Global Cloud Albedo and Climate Controlled by Marine Phytoplankton*, Nature 336, 441-445.
- Siegenthaler, U., Stocker, T.F. Monnin, E., Lu"thi, D., Schwander, J. , Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J.M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., dan Jouzel, J., 2005. *Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene*, J. Science 310, 1313.
- Sulaiman, W., 2004. *Analisis Regresi Menggunakan SPSS, Contoh Kasus dan Pemecahannya*, ISBN: 979-731-468-5, Penerbit Andi Yogyakarta, 1-138.
- Ward, Peter L., 2009. *Sulfur Dioxide Initiates Global Climate Change in Four Ways*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/tsf, Contents lists available at Science Direct, Thin Solid Films 517 (2009) 3188-3203.
- Wigley, T. M. L., 1989. *Possible Climate Change Due to SO₂-Derived Cloud Condensation Nuclei*, Nature 339, 365 - 367 (01 June 1989); doi:10.1038/339365a0.
- Wigley, T. M. L., 1991. *Cloud Reducing Fossil Fuel Emissions Cause Global Warming?*, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK, Nature Vol. 349.