

KAJIAN PERKEMBANGAN TEKNOLOGI *SOUNDING* UNTUK MENGUKUR KONSENTRASI CO₂ DI ATMOSFER

Novita Ambarsari dan Bambang S. Tedjasukmana
Peneliti Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN
email: novitaambar@yahoo.com

RINGKASAN

Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer sejak tahun 1950 menjadi perhatian dunia karena menimbulkan efek pemanasan global. Berbagai instrumen pengukur konsentrasi CO₂ dikembangkan mulai dari sensor optik untuk pengukuran secara langsung hingga teknologi *sounding* yang mengukur profil vertikal CO₂ dari antariksa menggunakan satelit. Teknologi *sounding* untuk menentukan profil vertikal CO₂ terus dikembangkan diawali dengan *Atmospheric Sounding Infrared Spectroradiometer* versi 1-3 di tahun 1980-1990an, penggunaan laser/LIDAR untuk *sounding* CO₂. Teknologi terbaru dan paling banyak digunakan adalah *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) milik NASA yang dipasang pada satelit AQUA. AIRS tidak hanya mengukur konsentrasi CO₂, tetapi juga mengukur jumlah awan, *trace gases* termasuk ozon, karbon monoksida, karbon dioksida, metana, sulfur dioksida, dan partikel tersuspensi di atmosfer. Hasil observasi AIRS menunjukkan konsentrasi CO₂ di Indonesia terus meningkat dari tahun 2002 hingga 2010 dengan interval konsentrasi antara 370 hingga 390 ppm.

1 PENDAHULUAN

Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas dengan konsentrasi tertinggi ke lima di atmosfer yang mengalami peningkatan sebanyak 35% dalam 300 tahun terakhir. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh aktivitas manusia dari pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan pengubahan lahan lainnya. Karbon monoksida berperan sebagai gas rumah kaca yang sangat penting. Peningkatan konsentrasi CO₂ menyebabkan peningkatan efek rumah kaca dan berkontribusi besar terhadap pemanasan global selama 100 tahun terakhir. Karbon dioksida secara alami juga mengalami siklus pertukaran melalui proses fotosintesis dan respirasi (Pidwirny, 2006).

Karbon adalah unsur yang menjadi bagian dari atmosfer, laut, tanah, batuan dan semua materi penyusun kehidupan. Karbon selalu berpindah melalui suatu siklus yang disebut siklus karbon. Perpindahan karbon dari satu tempat ke

tempat lain juga mengubah bentuk karbon menjadi senyawa-senyawa kimia lain. Di laut, karbon terlarut menjadi asam karbonat. Pada tanaman, karbon ditemukan sebagai glukosa. Di dalam Bumi, karbon berbentuk minyak atau gas alam. Dan di atmosfer, karbon ditemukan sebagai gas rumah kaca berupa CO₂ dan CH₄ ([http:// www.sciencecentercollaborative.org/nesc/backpack/backpack3.pdf](http://www.sciencecentercollaborative.org/nesc/backpack/backpack3.pdf)).

Karbon selalu berputar dari laut, atmosfer, ekosistem, dan geosfer. Semua makhluk hidup tersusun oleh karbon. Karbon merupakan unsur dasar pembangunan kehidupan dan komponen yang sangat penting dalam berbagai reaksi kimia. Proses kehidupan dibangun oleh karbon yang dioksidasi oleh O₂ menjadi CO₂. Siklus CO₂ di atmosfer diawali dengan penyerapan CO₂ oleh tanaman dan diubah menjadi energi melalui proses fotosintesis dengan bantuan sinar Matahari.

Melalui rantai makanan, karbon dalam bentuk glukosa pada tanaman

dimanfaatkan oleh hewan dan manusia. Dari makhluk hidup, karbon masuk ke dalam tanah saat mahluk hidup mati. CO₂ juga berpindah kembali dari mahluk hidup ke atmosfer melalui proses respirasi. CO₂ di atmosfer dihasilkan paling besar dari pembakaran bahan bakar fosil. Setiap tahun, lima setengah miliar ton CO₂ dilepaskan ke atmosfer dari pembakaran bahan bakar fosil. CO₂ di atmosfer kemudian diserap kembali oleh lautan dan hutan (Gardiner, 2008).

Siklus CO₂ di atmosfer sangat penting karena peran CO₂ sebagai selimut Bumi yang menangkap radiasi gelombang panjang. Meningkatnya jumlah CO₂ di atmosfer akan meningkatkan efek pemanasan temperatur Bumi. CO₂ adalah kontributor terbesar (63 %) dalam efek pemanasan global karena waktu hidupnya di atmosfer yang panjang dan jumlahnya yang selalu meningkat setiap tahunnya (ESRL, 2010).

Peningkatan jumlah CO₂ sejak awal revolusi industri disebabkan terutama akibat penggunaan bahan bakar fosil dan pengubahan lahan pertanian. Penelitian sejak 50 tahun terakhir menunjukkan trend peningkatan jumlah CO₂ yang akan terus berlanjut dan meningkat dengan lebih cepat (ESRL, 2010).

Pengukuran CO₂ menjadi hal yang sangat penting saat ini. Oleh karena itu, tulisan ini bertujuan untuk menjelaskan perkembangan teknologi instrumen pengukur CO₂ di atmosfer dari generasi pertama hingga instrumen terbaru berdasarkan teknologi *sounding* yang meliputi karakteristik teknis alat dan sensor yang digunakan, produk data dan analisisnya.

Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi pemanfaatan instrumen pengukur CO₂ di atmosfer untuk berbagai aplikasi serta pemanfaatan dan analisis data untuk berbagai

keperluan penelitian parameter atmosfer khususnya CO₂.

2 HUKUM RADIASI PLANCK DAN BOLTZMAN TERKAIT DENGAN PENGEMBANGAN SENSOR CO₂

Hukum radiasi Plank menjelaskan mengenai jumlah energi yang diemisikan oleh partikel berwarna hitam (partikel ideal) yang secara unik ditentukan oleh temperatur. Hukum ini kemudian dijelaskan dalam persamaan berikut (*The Engineering Toolbox*, 2011):

$$EA = \frac{c1}{\lambda^5 [\exp(c2/\lambda T) - 1]} \quad (2-1)$$

Keterangan:

$E\lambda$ = radiasi dari panjang gelombang tertentu

$c1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$

$c2 = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m K}$

λ = panjang gelombang

T = temperatur (Kelvin)

Hukum Plank juga menjelaskan bahwa partikel dengan suhu tinggi akan memancarkan energi pada panjang gelombang pendek, sedangkan partikel dengan suhu yang lebih rendah akan memancarkan energi pada panjang gelombang yang lebih panjang (*The Engineering Toolbox*, 2011).

Hukum Stefan-Boltzmann merupakan penurunan hukum Planck yang menjelaskan mengenai radiasi total partikel berwarna hitam ditentukan dengan mengintegrasikan hukum Plank untuk semua panjang gelombang (*The Engineering Toolbox*, 2011).

Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$E = \sigma T^4 \quad (2-2)$$

Keterangan:

E = radiasi partikel berwarna hitam dalam W m^{-2}

σ = tetapan Boltzmann

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T = temperatur (Kelvin)

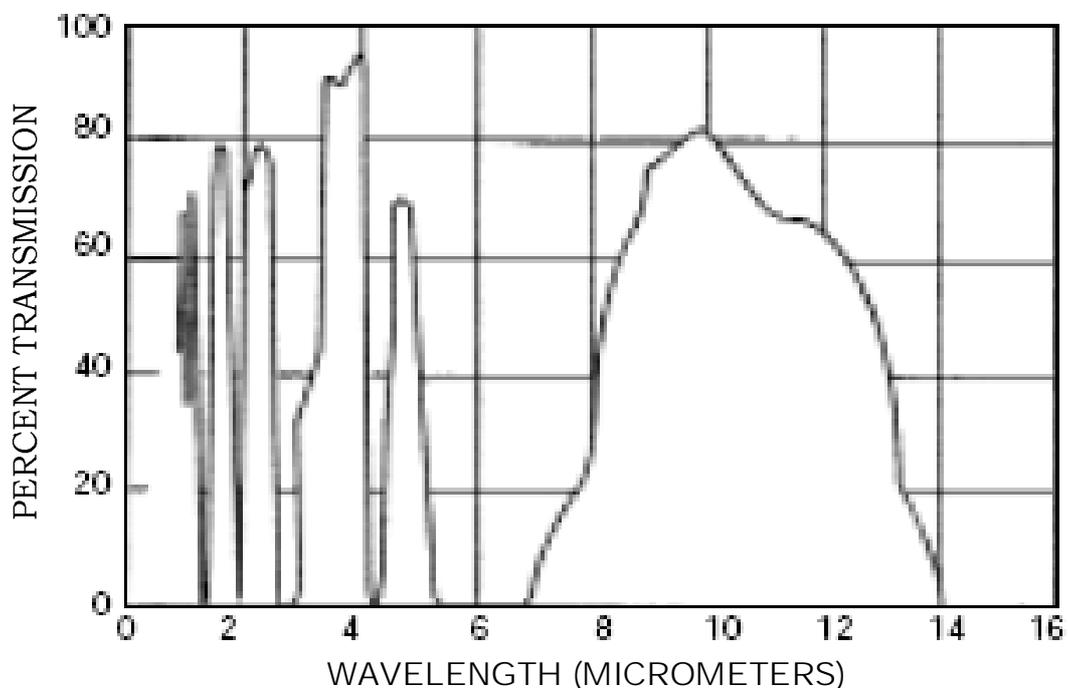
Atmosfer Bumi memiliki pengaruh yang sangat penting terhadap penyimpanan energi untuk sistem iklim global. Sumber energi Bumi yang utama adalah sinar Matahari yang memproduksi radiasi elektromagnetik dari reaksi fusi yang melibatkan hidrogen pada inti Matahari. Bumi menyerap radiasi UV kemudian memancarkannya kembali dalam panjang gelombang inframerah/energi panas (*The Engineering Toolbox*, 2011).

Pada dasarnya radiasi yang dipancarkan oleh suatu materi termasuk pada semua panjang gelombang. Akan tetapi, radiasi yang dapat digunakan untuk menentukan temperatur suatu materi hanya pada selang 0,3 μm hingga 20 μm . Panjang gelombang 0,4-0,7 μm merupakan daerah sinar tampak, sedangkan lebih dari 0,7 μm termasuk pada daerah inframerah.

Beberapa molekul kimia penyusun atmosfer memiliki kemampuan untuk menyerap radiasi inframerah pada

panjang gelombang yang sesuai dengan energi vibrasi molekul tertentu. Uap air merupakan molekul utama di atmosfer yang dapat menyerap radiasi inframerah pada 1.38, 1.87, 2.7, dan 6.3 μm . Karbon dioksida dan ozon juga termasuk molekul lain yang dapat menyerap radiasi inframerah. CO_2 menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang 2.0, 2.7, 4.3, dan 15.0 μm , sedangkan ozon menyerap pada 9.3 and 9.8 μm . Spektrum serapan masing-masing molekul tersebut dapat dilihat pada Gambar 2-1.

Kekhasan panjang gelombang inframerah yang diserap oleh setiap molekul inilah yang menjadi dasar pengukuran konsentrasi masing-masing molekul. Sensor CO_2 mengukur perbandingan energi radiasi inframerah yang diserap oleh molekul CO_2 dengan energi radiasi yang sampai ke permukaan sensor pada panjang gelombang yang khas untuk CO_2 .

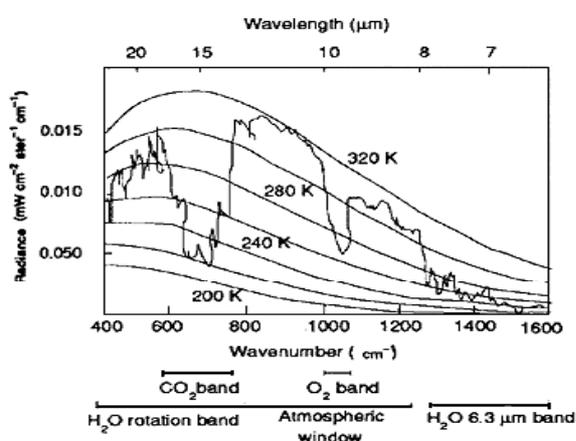


Gambar 2-1: Spektrum serapan radiasi inframerah beberapa molekul kimia. Sumber: <http://www.impacinfrared.com/uploads/Mikron/Datasheets/Applications/>

3 KONSEP DASAR *SOUNDING* CO₂ DENGAN SATELIT

"*Sounding*" merupakan istilah yang digunakan untuk menentukan profil vertikal temperatur atmosfer, kelembaban, maupun parameter lainnya sebagai fungsi dari ketinggian atau tekanan atmosfer. Teknologi *sounding* termasuk juga menentukan kandungan total uap air, total ozon, ketinggian awan, volume awan, temperatur permukaan, dan lain-lain. Teknologi *sounding* dapat digunakan juga untuk melakukan pengukuran jarak jauh spektrum radiasi melalui pemilihan jalur yang selektif, biasanya dilakukan untuk radiasi inframerah maupun radiasi pada daerah panjang gelombang mikro pada spektrum elektromagnetik (Griersmith, 2010).

Teknologi *sounding* untuk menentukan profil vertikal atmosfer dan komponennya sangat mungkin untuk dilakukan karena radiasi keluar yang dipancarkan Bumi sangat bergantung kepada radiasi dari permukaan Bumi, awan, dan atmosfer. Radiasi yang diemisikan telah dijelaskan dengan hukum *Planck* dan penurunannya dan dengan menentukan pita serapan pada daerah panjang gelombang yang sesuai dengan serapan senyawa yang diinginkan seperti CO₂, uap air, dan ozon (Griersmith, 2010).



Gambar 3-1: Bilangan gelombang pita serapan inframerah untuk CO₂, O₂, dan H₂O (Griersmith, 2010)

Teknologi *sounding* CO₂ dengan satelit berdasarkan pada sifat gas rumah kaca yang dimiliki CO₂. CO₂ bersifat menyerap radiasi inframerah yang dipancarkan permukaan Bumi kemudian memancarkannya kembali pada tingkat energi yang lebih rendah. Energi radiasi yang dipancarkan kembali oleh molekul CO₂ bergantung pada temperatur. Teknologi *sounding* CO₂ dengan satelit mengukur radiasi inframerah yang dipancarkan kembali oleh molekul CO₂ pada panjang gelombang yang sesuai dengan pita serapan molekul CO₂. Pada Gambar 3-1 terlihat pita serapan yang spesifik untuk molekul CO₂ pada panjang gelombang 15 μm (NASA, 2011).

4 PERKEMBANGAN TEKNOLOGI *SOUNDING* CO₂

Pengukuran konsentrasi CO₂ dengan teknologi *Sounding* ini terus berkembang seiring dengan peningkatan konsentrasi CO₂ dan efek pemanasan global yang mulai dirasakan saat ini. Pada panjang gelombang 15 μm dan 4,3 μm pita serapan karbon monoksida diambil beberapa saluran. Pita serapan CO₂ pada panjang gelombang tersebut tidak mengalami tumpang tindih dengan molekul lain dari permukaan Bumi hingga ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Masing-masing saluran mencakup informasi temperatur atmosfer. Hal ini yang dijadikan dasar dalam penentuan profil vertikal temperatur atmosfer dan komponennya.

4.1 *Sounding* CO₂ Menggunakan Spektrometer Inframerah

Spektrometer inframerah telah dipasang pada beberapa satelit untuk *sounding* jarak jauh terutama untuk memperoleh profil temperatur atmosfer dan kelembabannya. Sejak tahun 1980 telah dikembangkan tiga versi spektrometer inframerah untuk memperoleh profil vertikal temperatur atmosfer dan komponennya sebagai berikut:

4.1.1 Atmospheric sounding infrared spectroradiometer, versi 1 (experimental model)

Pada tahun 1980-1984 model percobaan dari instrumen *Atmospheric Sounding Infrared Spectroradiometer* versi 1 (ASIS-1) telah dikembangkan. *Design* alat ini dikembangkan dengan jalur tunggal optik, sembilan saluran, dan sepuluh *filter* seperti pada detektor piroelektrik (Wang, 1999).

ASIS-1 memiliki stabilitas temperatur yang sangat baik pada temperatur ruang. Sistem optik ASIS-1 tersusun oleh lensa dan pipa sinar yang digunakan pertama kali. Keunggulan ASIS-1 di antaranya memiliki efisiensi optik yang sangat tinggi dan menghasilkan permukaan gambar yang cukup baik (Wang, 1999).

ASIS-1 telah terkalibrasi dan menunjukkan karakteristik yang mirip dengan alat *Vertical Temperature Point Radiometer* (VTPR) pada satelit meteorologi milik NOAA Amerika Serikat (Wang, 1999).

4.1.2 Atmospheric sounding infrared spectroradiometer, versi 2 (experimental model)

Pada tahun 1986-1991 model percobaan instrumen *Atmospheric Sounding Infrared Spectroradiometer* versi 2 (ASIS-2) telah dikembangkan dan dipasang pada satelit TIROS-N milik Amerika Serikat. Pengembangan telah dilakukan pada instrumen ini meliputi cakupan panjang gelombang yang lebih panjang juga panjang gelombang yang pendek, inframerah dekat, dan sinar tampak (Wang, 1999).

ASIS-2 memiliki 20 saluran optik dengan roda pada filter yang berputar dengan kecepatan 10 putaran/detik sehingga gelombang panjang dan gelombang pendek terpisah masing-masing dalam 12 dan 7 saluran. Metode kontrol menggunakan mikroprosesor dengan waktu pengukuran hanya sekitar 100 ms (Wang, 1999).

4.1.3 Infrared spectrometer versi 3

Sejak pertengahan tahun 1996, *Infrared Spectrometer* versi 3 telah dikembangkan. Beberapa pengembangan yang dilakukan pada *Infrared Spectrometer* versi 3 dibandingkan dengan versi 2 adalah sebagai berikut (Wang, 1999):

- Lima panjang gelombang inframerah dekat dan LWIR (*Long Wave Infrared* atau inframerah jauh) ditambahkan pada ASIS-2 sehingga jumlah saluran bertambah dari 20 menjadi 26.
- Sensitivitas *spectrometer* inframerah versi 3 ini ditingkatkan pada skala yang lebih besar.
- Resolusi spasial ditingkatkan menjadi 14 km (pada ketinggian satelit 833 km)
- Empat elemen pipa cahaya menggambarkan jalan masuk untuk dua saluran *Near Infra Red* (NIR) sehingga menjadikan struktur alat ini lebih kokoh.

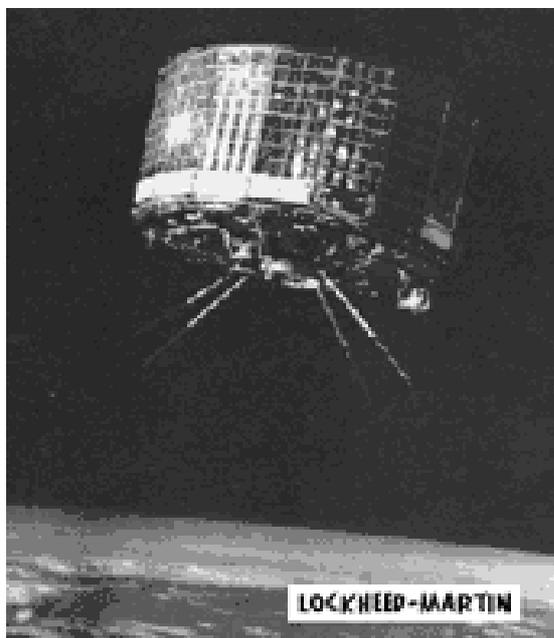
4.2 Sounding CO₂ Menggunakan Laser

Sejak tahun 1987 pengukuran CO₂ menggunakan laser, salah satu instrumennya adalah LIDAR sudah dikembangkan menggunakan metode *Differential Absorption Lidar* (DIAL). Penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan laser untuk menentukan konsentrasi CO₂ telah memilih panjang gelombang 4,88 μm dan 2 μm . Penelitian saat ini mengembangkan pengukuran pada panjang gelombang 15 μm yang sangat spesifik untuk serapan CO₂ seperti yang telah dilakukan oleh James B. Abshire, dkk dari NASA pada tahun 2001. Penelitian ini terus berlanjut hingga sekarang (Abshire, J.B, et.al, 2001).

4.3 Sounding CO₂ Menggunakan Satelit

Satelit pertama yang mengukur CO₂ diluncurkan oleh NASA pada tahun 1960. Satelit ini bernama TIROS (*Television Infrared Observation Satellite*). TIROS merupakan satelit meteorologi pertama yang berorbit polar dengan seri yang lama. Pada perkembangan

selanjutnya TIROS kemudian diikuti dengan TOS (*TIROS Operational System*) lalu ITOS (pengembangan dari TIROS), dan yang terakhir adalah seri dari NOAA.



Gambar 4-1: TIROS [TIROS quick look, JPL]

Satelit TIROS dikembangkan oleh GSFC (*Goddard Space Flight Center*) dan diatur oleh ESSA (*Environmental Science Services Administration*). Tujuan satelit ini adalah untuk menstabilkan sistem satelit pemantau cuaca global. TIROS dilengkapi dengan televisi beresolusi rendah dan kamera inframerah [TIROS *quick look*, JPL].

Perkembangan selanjutnya dari TIROS adalah TOVS (*TIROS Operational Vertical Sounder*) yang terdiri dari tiga komponen terpisah yaitu *High Resolution Infrared Radiation Sounder Version 2* (HIRS/2), *Microwave Sounding Unit* (MSU) dan *Stratospheric Sounding Unit* (SSU). Komponen yang mengukur profil vertikal CO₂ adalah SSU yang memiliki tiga saluran pada pita serapan CO₂ yaitu 15 μm . TOVS kemudian dikembangkan lagi menjadi ATOVS (*Advance TIROS Operational Vertical Sounder*) yang dipasang pada satelit Metop-A (*Atmospheric Profiles: TOVS-NOAA* (FIFE).

Instrumen generasi terbaru diluncurkan pada tahun 2002 dengan satelit AQUA oleh NASA yaitu *The Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) dibangun oleh BAE SYSTEMS untuk NASA/JPL. AIRS juga mengukur jumlah awan, trace gases termasuk ozon, karbon monoksida, karbon dioksida, metana, sulfur dioksida, dan partikel tersuspensi di atmosfer. AIRS mengukur sinar inframerah yang dipancarkan dari permukaan Bumi dan dari atmosfer. Data yang dihasilkan AIRS terfokus hanya pada lapisan troposfer tengah (NASA, 2011).

4.3.1 Sounding CO₂ dengan the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)

AIRS diluncurkan ke orbit Bumi pada tanggal 4 Mei 2002, bertujuan untuk mendukung penelitian mengenai iklim dan mengembangkan teknologi ramalan cuaca. AIRS merupakan satu dari enam instrumen yang dipasang pada satelit AQUA, bagian dari sistem observasi Bumi yang dilakukan oleh NASA. AIRS dipasang bersama instrumen pendukungnya *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU-A), menghasilkan sistem *sounding* atmosfer paling handal yang ada di angkasa yang mengobservasi siklus air dan energi global, variasi dan kecenderungan iklim, dan respon sistem iklim terhadap peningkatan gas rumah kaca. AIRS memiliki resolusi spektral 100 kali lebih tinggi dibandingkan dengan instrumen IR lain yang pernah ada dan menghasilkan informasi profil vertikal temperatur dan kelembaban atmosfer yang jauh lebih akurat. AIRS juga dapat menentukan gas rumah kaca yang ada di atmosfer seperti ozon, karbon monoksida, karbon dioksida, dan metana (NASA, 2011).

4.3.2 Produk data AIRS

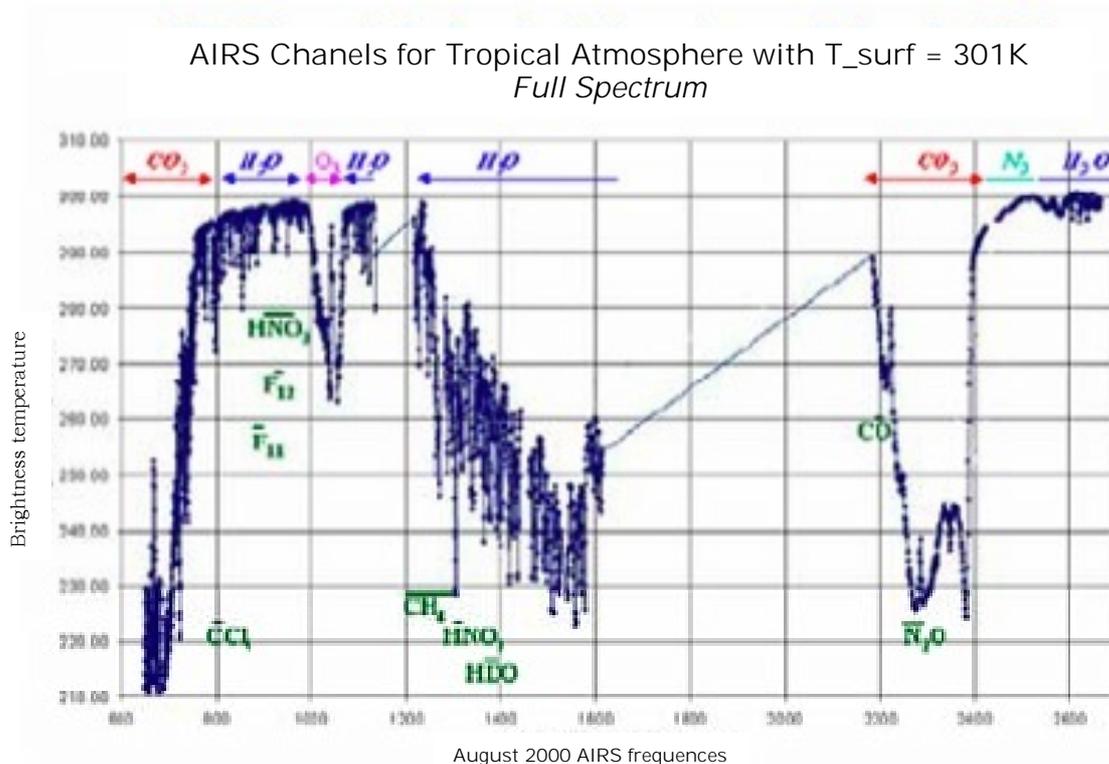
Data utama yang dihasilkan dari satelit pengukur CO₂ berbasis *sounding*,

dalam hal ini AIRS, merupakan spektrum radiasi inframerah dengan 2378 frekuensi individual untuk masing-masing gas di atmosfer, tidak hanya CO₂. Spektrum inframerah yang dihasilkan kaya akan informasi mengenai berbagai gas yang ada di atmosfer. Data ini membentuk seperti "sidik jari" atmosfer untuk waktu dan tempat yang diinginkan sehingga bisa digunakan sebagai rekaman data iklim untuk generasi mendatang.

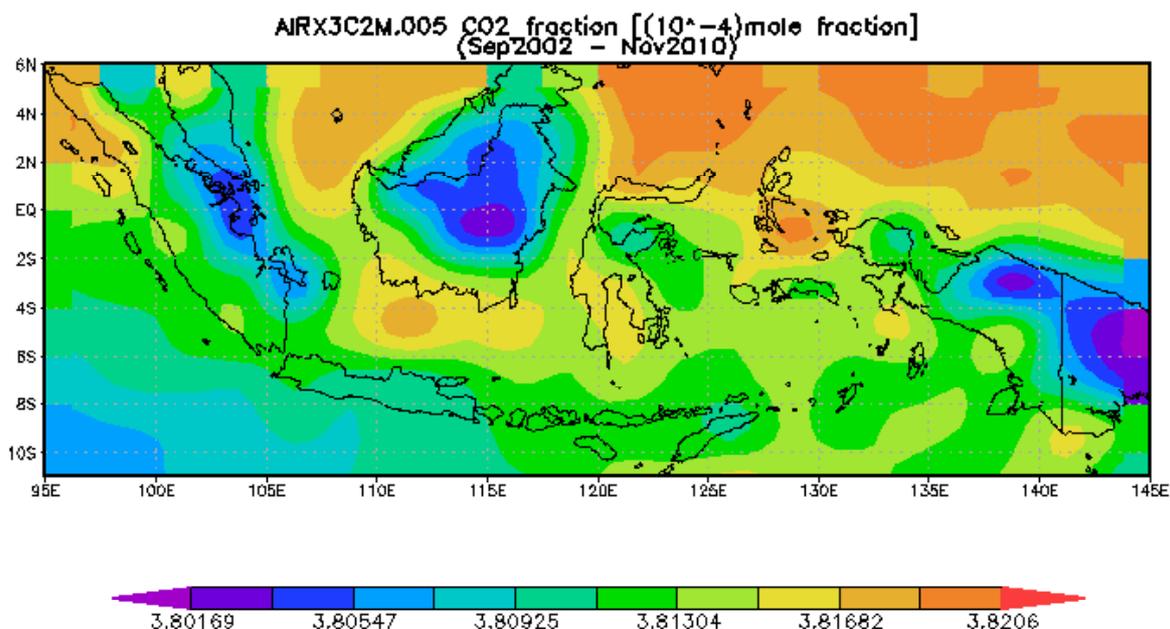
Salah satu produk data AIRS untuk konsentrasi CO₂ adalah data spasial dan *time series* yang ditunjukkan pada Gambar 4-3 dan 4-4. Gambar ini merupakan hasil visualisasi data yang dapat diunduh secara langsung melalui

website GIOVANNI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>).

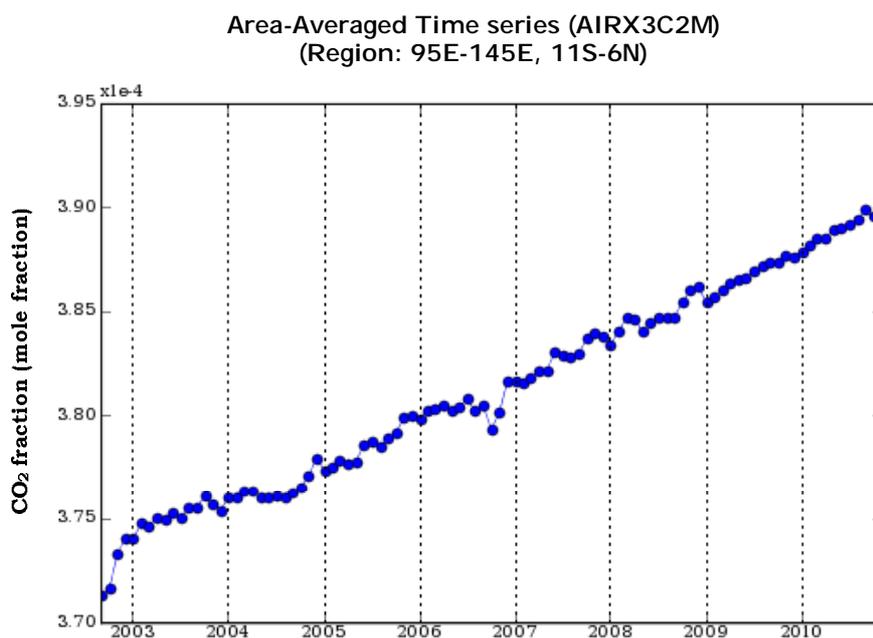
Giovanni merupakan aplikasi yang disediakan oleh NASA untuk mempermudah memperoleh, memvisualisasikan, dan menganalisis data hasil penginderaan jauh dengan fasilitas data Ascii yang dapat langsung diunduh. Dari Gambar 4-3 diketahui bahwa konsentrasi CO₂ Indonesia pada bulan September 2002 hingga Desember 2010 berada pada kisaran di atas 380 ppm dan Gambar 4-4 menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi CO₂ di Indonesia dari tahun 2002 hingga 2010 dengan variasi konsentrasi antara 370 hingga 390 ppm.



Gambar 4-2: Spektrum serapan untuk berbagai senyawa kimia yang dihasilkan AIRS.sumber: [http://airs.jpl.nasa.gov/data/data_product_descriptions/]



Gambar 4-3: Produk data AIRS berupa fraksi mol CO₂ untuk wilayah Indonesia September 2002 - November 2010



Gambar 4-4: Produk data AIRS berupa grafik time series CO₂ dari bulan September 2002 hingga bulan November 2010

5 PENUTUP

Teknologi *sounding* adalah teknik pengukuran CO₂ dan parameter atmosfer lainnya sebagai fungsi dari ketinggian. Instrumen pengukur CO₂ dengan teknologi *sounding* saat ini telah semakin berkembang. *Sounding* dengan

spektrometer inframerah, *sounding* dengan laser (LIDAR), dan *sounding* dengan satelit menjadi teknologi terbaru yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur konsentrasi CO₂ dan komponen atmosfer lainnya. Instrumen *sounding* terbaru dengan cakupan data

yang luas dan resolusi yang akurat untuk mengukur CO₂ di atmosfer adalah *The Atmospheric Infrared Sounders* (AIRS) yang diluncurkan pada satelit AQUA milik NASA. AIRS tidak hanya mengukur CO₂ tetapi juga gas rumah kaca lainnya seperti ozon dan metana. AIRS merupakan instrumen pengukur CO₂ yang terbaik di antara yang lain hingga saat ini karena resolusi spektralnya yang sangat baik yaitu 100 kali lebih tinggi daripada instrumen lainnya juga didukung oleh instrumen pendukungnya *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU-A) yang menghasilkan sistem *sounding* atmosfer paling handal. AIRS menghasilkan spektrum inframerah dengan 2378 spektrum individual untuk masing-masing gas di atmosfer, tidak hanya CO₂. Spektrum inframerah yang dihasilkan kaya akan informasi mengenai berbagai gas yang ada di atmosfer. Produk data AIRS yang sangat mudah diperoleh dengan format data dan gambar yang telah divisualisasikan melalui website GIOVANNI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>) juga menjadi salah satu keunggulan utama AIRS dibandingkan instrumen lain. Dari hasil pengukuran AIRS diketahui bahwa konsentrasi CO₂ di Indonesia terus meningkat dari tahun 2002 hingga 2010 dengan konsentrasi 370 hingga 390 ppm.

DAFTAR RUJUKAN

Abshire, JB., Riris, H., Allan, G., Sun, X., Chen, J., Kawa S.R., Mao, JP., Stephen, M., and Burris, J.F., 2006. *Laser Sounder for Global Measurement of CO₂ Concentrations in the Troposphere from Space: Update*, Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract IN21A-1197, 2006. Pidwirny, M. 2006. "Atmospheric Composition". *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition.

Climate change backpack presenters guide, 2011. <http://www.sciencecentercollaborative.org/nesc/backpack/backpack3.pdf>. tanggal akses 3 Januari 2011.

ESRL, 2011. *Carbon Cycle Science*, <http://www.esrl.noaa.gov/research/themes/carbon/>, tanggal akses 10 Januari 2011.

GIOVANNI. (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>). tanggal akses 1 Januari 2011.

Griensmith, D. C., 2011. *Radiative Transfer and Remote Sounding*. Infrared thermometers: theory and construction, 2011, http://www.impactinfrared.com/uploads/Mikron/Datasheets/Applications/Theory_IRSensors.pdf, tanggal akses 7 Januari 2011.

Johnson, R., 2010. *The Carbon Cycle*, http://www.windows2universe.org/earth/Water/co2_cycle.html. tanggal akses 31 Januari 2011.

NASA, 2011. *How AIRS Work*, http://airs.jpl.nasa.gov/instrument/how_AIRS_works/. Tanggal akses 3 Januari 2011.

NASA, 2011. *AIRS and Carbon Dioxide: From Measurement to Science*, 2011, http://airs.jpl.nasa.gov/story_archive/Measuring_CO2_from_Space/Measurement_to_Science/. Tanggal akses 7 Januari 2011.

NASA, 2011. *AIRS Mission*, <http://airs.jpl.nasa.gov/mission/description/>. Tanggal akses 7 Januari 2011.

NASA, 2011. *AIRS Data Product Description*, http://airs.jpl.nasa.gov/data/data_product_descriptions/. Tanggal akses 7 Januari 2011.

TIROS quick look, JPL, 2011. <http://space.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/tirosQL.html>. tanggal akses 7 Januari 2011.

TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS), <http://www.ozonelayer.noaa.gov/action/tovs.htm>. Tanggal akses 7 Januari 2011.

The Engineering Toolbox, 2011. *Radiation Heat Transfer*, [http:// www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d_431.html](http://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d_431.html). tanggal akses 1 Januari 2011.

Wang, M and Zhang, Z., 1999. *Progress in Infrared Sounding Technique Of Atmospheric Temperatur Profile*, Asian Conference on Remote Sensing, GIS Development.